

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Nasazení optického zesilovače pro EPON síť**  
**Deployment of Optic Amplifier into the EPON Network**

**2014**

**Michal Tkáčik**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Tkáčik**  
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika  
Téma: **Nasazení optického zesilovače pro EPON síť**  
**Deployment of Optic Amplifier into the EPON Network**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je otestování zesilovače SOA pro EPON síť a zjištění maximálního dosahu optické sítě. Práce vychází z požadavků praxe a je experimentální a simulační. Výsledky se porovnávají vůči simulovaným hodnotám zjištěných skrze softwarovou aplikaci Optiwave. Student navrhne model optické sítě a její topologii a poté tu samou topologii zapojí reálně v laboratoři a proměří.

1. Popis a rozbor technologie EPON.
2. Popis optického zesilovače pro EPON síť.
3. Simulace vlastností topologie EPON sítě se zapojeným zesilovačem v softwarové aplikaci Optiwave.
4. Experimentální zapojení vláknové optické sítě do EPON sítě.
5. Vyhodnocení simulovaných a naměřených dat.

Seznam doporučené odborné literatury:

- PREMARATNE, M., Agrawal, G., P. *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 284 s. ISBN 978-0521493482.
- BJARKLEV, A. *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications (The Artech House Optoelectronics Library)*, Vydání 1. Artech Print on Demand, 1993. 408 s. ISBN 978-0890066591.
- SHIMADA, S., Ishio, H. *Optical Amplifiers and their Applications*, Vydání 1. John Wiley & Sons, 1994. 288 p. ISBN 978-0471940050.
- LEEE, T. P. *Current Trends in Optical Amplifiers and Their Applications (Selected Topics in Electronics and Systems)*. World Scientific Pub Co Inc, 1996. 222 s. ISBN 978-9810226954.
- DUTTA, N a Qiang WANG. *Semiconductor optical amplifiers*. Vydání 2. ISBN 978-981-4489-034.
- NEMOVA, G. *Optical Amplifiers (Physics Research and Technology)*. Nova Biomedical Books, 2011. 337 s. ISBN 978-1612098357.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

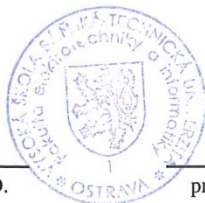
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 6. mája 2014

  
.....  
podpis

## **Pod'akovanie**

Rád by som pod'akoval vedúcemu tejto bakalárskej práce Ing. Janovi Látalovi za jeho metodické vedenie a odborné rady pri vypracovaní.

## **Abstrakt**

Cieľom tejto bakalárskej práce je otestovanie polovodičového optického zosilňovača v rámci siete EPON a poukázať na výhody jeho použitia. Teoretická časť sa skladá z jednotlivých kapitol v ktorých sú postupne definované vlastnosti optických prístupových sietí, ich základné časti a rozdelenie do skupín podľa spôsobu komunikácie. Popis pasívnych optických sietí a ich rozdelenie podľa použitých technológií prenosu. Samostatná kapitola popisuje sieť EPON, princíp fungovania a prenos dát. Ďalšia kapitola je zameraná na optické zosilňovače, kde je popísaný proces zosilnenia a popis základných druhov zosilňovačov využívaných v optických telekomunikáciach. Hlbšie zameranie je na polovodičový optický zosilňovač a jeho vlastnosti.

Praktická časť je tvorená návrhom siete EPON s nasadením SOA zosilňovača v programe OptiSystem s popisom použitých prvkov a nastavených parametrov spolu s odôvodnením. Simulácia je zároveň vyhodnotená a porovnáva sieť s využitím zosilňovača a bez neho. Takisto je popísaná konfigurácia OLT iMAP 9102 a popis uskutočneného merania maximálneho dosahu siete. V závere je spracované porovnanie výsledkov simulácie a meraní v laboratóriu.

## **Kľúčové slová**

Pasívna optická sieť; prístupová sieť; vlákno; dosah; polovodičový optický zosilňovač; ONU; OLT; ODN; EPON; PON; SOA; útlm; trasa; simulácia; zosilnenie

## **Abstract**

The goal of this bachelor's thesis is to test semiconductor optical amplifier within EPON network and show the advantages of his use. The theoretical part consists of individual chapters where are gradually defined optical access networks, their properties, primary parts and their division to groups by method of communication. Passive optical networks and their division according to used transport technologies are also described in theoretical part. Single chapter describes EPON network, principle of operation and data transmission. Next chapter is focused on optical amplifiers, where amplification process and description of the main types of optical amplifiers used in optical communications are discussed. Greater focus is directed to semiconductor optical amplifier and his properties.

The practical part is formed to design EPON network with deployment of semiconductor optical amplifier in OptiSystem software with description of used elements and parametres setup together with reasoning. Simulation is simultaneously evaluated and compared to results of experimental EPON setup with SOA and without SOA. It also describes configuration of OLT iMAP 9102 and description of executed measuerements which were aimed to find out maximum range of network. Comparison of measured and simulated results is content of the last chapter.

## **Key words**

Passive optical network; access network; fiber; range; semiconductor optical amplifier; ONU; OLT; ODN; EPON; PON; SOA; attenuation; simulation; amplification

## Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
<b>APC</b>	Angle-Polished Conector	pod uhlom leštený konektor
<b>APD</b>	Avalanche Photodiode	lavínová fotodióda
<b>APON</b>	ATM Passive Optical Network	pasívna optická sieť založená na ATM
<b>ASE</b>	Amplified Spontaneous Emission	zosilnená spontánna emisia
<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode	asynchronný prenos dát
<b>BPON</b>	Broadband Passive Optical Network	širokopásmová pasívna optická sieť
<b>BER</b>	Bit Error Rate	bitová chybovosť
<b>CATV</b>	Cable Television	káblová televízia
<b>CO</b>	Central Office	centrálny bod
<b>DFA</b>	Doped Fiber Amplifier	dopovaný vláknový zosilňovač
<b>DRA</b>	Distributed Raman Amplifier	rozprestrený Ramanov zosilňovač
<b>EPON</b>	Ethernet Passive Optical Network	pasívna optická sieť založená na Ethernete
<b>GPON</b>	Gigabit Passive Optical Network	gigabitová pasívna optická sieť
<b>IP</b>	Internet Protocol	internetový protocol
<b>LED</b>	Light Emitting Diode	svetlo emitujúca diode
<b>LRA</b>	Lumped Raman Amplifier	diskrétny Ramanov zosilňovač
<b>MAC</b>	Medium Access Control	riadenie prístupu k médiu
<b>P2P</b>	Point-to-Point	komunikácia bod – bod
<b>P2MP</b>	Point-to-MultiPoint	komunikácia bod – viac bodov
<b>PON</b>	Passive Optical Network	pasívna optická sieť
<b>RTT</b>	Round Trip Time	čas prejdenia okruhu
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio	pomer odstuhu signal od šumu
<b>SPC</b>	Straight-Polished Connector	rovno leštený konektor
<b>SRS</b>	Stimulated Raman Scattering	stimulovaný Ramanov rozptyl
<b>TDM</b>	Time Division Multiplexing	multiplexovanie podľa času
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing	multiplexovanie podľa vlnovej dĺžky



# Obsah

Úvod .....	- 12 -
1 Optické siete.....	- 13 -
1.1 Prístupové siete .....	- 13 -
1.2 Optické prístupové siete .....	- 14 -
1.2.1 Základné časti optických prístupových sietí.....	- 14 -
1.2.2 Optické vlákno .....	- 14 -
1.2.3 Pasívne optické rozbočovače (splitter) .....	- 16 -
1.2.4 Optické konektory .....	- 16 -
2 Sieťe typu FTTx.....	- 17 -
2.1 P2P a P2MP optické siete.....	- 18 -
2.1.1 P2P .....	- 18 -
2.1.2 P2MP .....	- 18 -
2.2 Aktívna optická sieť (AON).....	- 19 -
2.3 Pasívna optická sieť (PON).....	- 20 -
2.3.1 Burst módomý optický prenos v TDM pasívnych sieťach .....	- 21 -
2.3.2 APON .....	- 22 -
2.3.3 BPON .....	- 22 -
2.3.4 GPON .....	- 22 -
2.3.5 10GEPON.....	- 23 -
2.3.6 WDM-PON .....	- 23 -
3 EPON .....	- 24 -
3.1 Štruktúra Ethernetového rámca .....	- 24 -
3.2 Transportná vrstva.....	- 25 -
3.2.1 Zostupný smer .....	- 25 -
3.2.2 Vzostupný smer .....	- 26 -
3.3 Multi-Point Control Protocol.....	- 27 -
3.4 Burst módomý pracovný režim .....	- 29 -
4 Optické zosilňovače .....	- 31 -
4.1 Aplikačné využitie optických zosilňovačov .....	- 31 -

4.2	Rozdelenie zosilňovačov podľa umiestnenia na telekomunikačnej trase....	- 31 -
4.3	Delenie zosilňovačov podľa spracovania signálu .....	- 33 -
4.4	Zosilňovací mechanizmus .....	- 34 -
4.5	Požiadavky na optické zosilňovače .....	- 36 -
4.6	Optické zosilňovače s dopovaným vláknom .....	- 36 -
4.6.1	Erbium dopovaný optovláknový zosilňovač (EDFA) .....	- 37 -
4.6.2	Praseodym dopovaný optovláknový zosilňovač (PDFA).....	- 39 -
4.6.3	Thulium dopovaný optovláknový zosilňovač (TDFA) .....	- 39 -
4.7	Ramanove zosilňovače.....	- 39 -
4.7.1	Princíp zosilňovania .....	- 40 -
4.7.2	Čerpace zdroje.....	- 40 -
4.7.3	Druhy Ramanových zosilňovačov.....	- 40 -
5	Polovodičový optický zosilňovač.....	- 42 -
4.8	Trawelling- wave zosilňovač (TWA) a Fabry-Perot zosilňovač (FPA).....	- 45 -
4.9	Nelinearity v SOA .....	- 46 -
6	Simulácia siete EPON v softwarovej aplikácii Optiwave s nasadením SOA.....	- 48 -
6.1	Cieľ návrhu.....	- 48 -
6.2	Návrh optickej siete.....	- 49 -
6.2.1	OLT .....	- 49 -
6.2.2	ONU .....	- 50 -
6.2.3	ODN .....	- 51 -
6.3	Zosilnenie optického signálu.....	- 53 -
6.4	Sieť EPON bez zosilňovača .....	- 59 -
6.5	Vyhodnotenie simulovaný dat.....	- 60 -
7	Zapojenie optického zosilňovača do EPON siete.....	- 61 -
7.1	Základná konfigurácia OLT a registrácia ONU jednotky .....	- 61 -
7.2	Zapojenie polovodičového zosilňovača .....	- 64 -
7.3	Meranie maximálneho dosahu siete EPON .....	- 67 -
7.3.1	Spektrálna analýza optického signálu .....	- 67 -
7.4	Vyhodnotenie .....	- 71 -
8	Záver .....	- 72 -

Použitá literatúra .....	I
Prílohy .....	IV
Zoznam príloh .....	VI

## Úvod

V dnešnej dobe sa veľmi často využívajú optické siete. Ich využitie sa uplatňuje najmä v systémoch na dlhé trasy, pričom majú optické siete oproti metalickým obrovské množstvo výhod. Tie hlavné výhody sú vysoké prenosové rýchlosti, kapacita siete, odolnosť voči elektromagnetickým vplyvom vysoká bezpečnosť komunikácie a už spomenutá komunikácia na dlhé trasy.

Avšak vzialenosť, ktorá môže byť prekonaná je obmedzovaná najmä stratami vo vláknach. Kedysi boli tieto straty kompenzované elektrickými regenerátormi, ktoré prijatý optický signál previedli na elektrický, opravili ho a s pomocou laseru posielali ďalej ako optický signál. Tieto zariadenia boli pomerne zložité a finančne nákladné, preto sa začali vyvíjať a používať plne optické zosilňovače bez nutnosti prevádzania optického signálu na elektrický.

V úvodných kapitolách popisujem optické prístupové siete, ich základné vlastnosti a rozdelenie podľa spôsobu komunikácie. Zameriavam sa hlavne na pasívne optické siete a prvky z ktorých sa skladajú. Ďalej sa zameriavam na pasívnu optickú sieť založenú na Ethernete, kde vysvetľujem režimy komunikácie medzi jednotkami.

Ďalšie kapitoly sú zamerané na optické zosilňovače, kde sú popísané princípy činnosti, charakteristické vlastnosti a rozdelenie podľa spôsobu zosilňovania optického signálu. Samostatná kapitola je venovaná polovodičovému optickému zosilňovaču a vysvetleniu princípu zosilňovania ako aj javov s tým spojenými.

V praktickej časti navrhнем sieť EPON spolu aj s využitím SOA zosilňovača v softwarovej aplikácii OptiSystem. Vysvetlím dôvod využitia jednotlivých prvkov a nastavenie parametrov. Výsledky simulácie spracujem, ukážem vlastnosti siete s využitím zosilňovača ale aj bez neho. V ďalšej časti popisujem konfiguráciu siete EPON a skúmam maximálny dosah siete.

# 1 Optické siete

## 1.1 Prístupové siete

Hlavná štruktúra modernej telekomunikačnej siete pozostáva z troch hlavných častí: chrbtová sieť, regionálna sieť a prístupová sieť.

Chrbtové siete sa využívajú pre prenos dát na dlhé vzdialenosti a regionálne siete sú zodpovedné za starostlivosť o premávku a multiplexovacie funkcie v sieti. Štruktúra chrbtových a regionálnych sietí je zvyčajne jednotnejšia ako štruktúra prístupových sietí a ich ceny sa rozdeľujú medzi veľké množstvo užívateľov. Tieto siete sú vybudované s state-of-the-art optickými vláknami a WDM technológiami k poskytnutiu vysoko-kapacitných pripojení.

Prístupové siete sa tradične nazývajú siete poslednej míle a zahŕňajú segment pripojenia medzi CO poskytovateľa a koncovým užívateľom poskytujú konektivitu. Príkladom prístupových sietí sú krútené medené páry pripojujúce domácnosti a koaxiálny kábel od poskytovateľa služieb CATV. Bezdrátovou prístupovou sieťou je Wii-Max, ktorý využíva rádiové vlny pre pripojenie poslednej míle. Optické vlákna boli prevažne využívané v chrbtových sieťach vďaka obrovskej šírke pásma a veľmi malým stratám.

V dnešnej dobe už sú však optické prístupové siete bežnou vecou. Nároky obyvateľov na služby sú veľmi vysoké, preto sa operátori snažia o čo najvyššie pokrytie týchto požiadaviek. S tým súvisí aj veľká investícia na rozvoj nových a lepších optických technológií. Následné výhody s vybudovanou optickou infraštruktúrou však prevažujú nevýhody, ktoré sú okrem vyššej ceny inštalácie aj krehkosť optického vlákna a náchylnosť na ohyby. Výhod je však nesporné viac.

Hlavnými výhodami sú:

- Vysoké prenosové rýchlosti resp. prenosová kapacita, ktorá v závislosti od typu použitého optického vlákna môže dosahovať až stovky Gbit/s,
- vysoká spoľahlivosť tzn. nieje náchylná na elektromagnetické vplyvy,
- veľmi nízky útlm, jedná sa o jednotky dB/km až do 0,2 dB/km, čo umožňuje dosah signálu bez použitia zosilňovača cez 100 km.

## 1.2 Optické prístupové siete

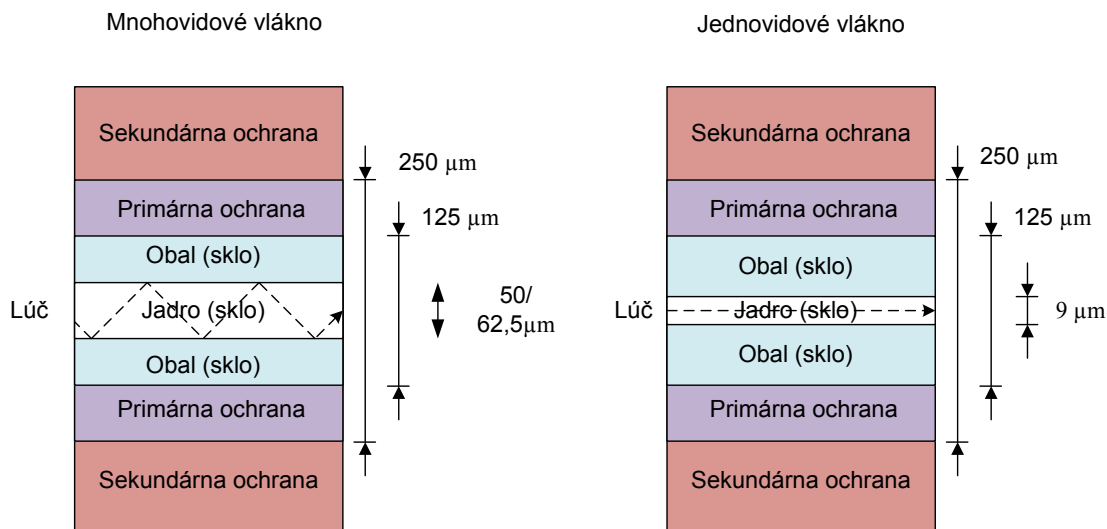
### 1.2.1 Základné časti optických prístupových sietí

- Optické linkové zakončenie (OLT) – zariadenia má funkciu sieťového rozhrania medzi sieťou telekomunikačných služieb a prístupovou sieťou, je umiestnený v CO (centrála) a riadi prenos v ODN.
- Optická distribučná sieť (ODN) – súbor prenosových prostriedkov medzi OLT a ONU jednotkami, je zložená z transportnej a distribučnej časti navzájom oddelencých distribučným bodom. Podľa realizácie tohoto bodu delíme sieť na pasívne alebo aktívne.
- Optická sieťová jednotka (ONU) – zariadenie má funkciu rozhrania medzi metalickou a optickou časťou prístupovej siete, zvyčajne umiestnené v skrini pri budove alebo konkrétnom mieste v rámci budovy. Od tohoto bodu je k zákazníkovi zvyčajne vyvedené metalické vedenie. Umiestnenie tohoto zariadenia je dané sieťami typu FTTx [17].

### 1.2.2 Optické vlákno

Optické vlákno je vlnovod valcovitého tvaru vyrobený z dielektrického materiálu, kde pre veľké vzdialenosti sa používa kremičité sklo ( $\text{SiO}_2$ ) a pre kratšie vzdialenosti sa používa plast. Úlohou optického vlákna je prepraviť svetelný lúč od zdroja do detektora s čo najmenšími stratami. Dokáže preniesť ďaleko väčšie množstvo informácie ako metalické vedenie, pretože jeho šírka pásma sa pohybuje v oblasti  $\sim 200\text{THz}$ , vďaka čomu nie je náchylné na elektromagnetické rušenie. V optických vláknach sa pre prenos informácie používajú vlnové dĺžky od 500 nm až do 1600 nm, pritom najvýhodnejšia oblasť je v rozmedzí 1300 – 1600 nm, pri ktorej sú najnižšie straty pri prenose.

Jeho vlastnosti mu umožňujú využitie v prístupových sieťach na dlhé vzdialenosti. Optické vlákna sú veľmi citlivé na mechanické namáhanie a ohyby. Ich ochranu preto musí zabezpečiť optický kábel, ktorý okrem jedného alebo viacerých optických vlákien obvykle obsahuje aj vhodnú výplň, ktorá zabezpečí potrebnú mechanickú odolnosť. Zloženie optického kábla je zobrazené na Obr. 1.1 [22]. V optických vláknach sa pre prenos informácie používajú vlnové dĺžky od 500 nm až do 1600 nm, pritom najvýhodnejšia oblasť je v rozmedzí 1300 – 1600 nm, pri ktorej sú najnižšie straty pri prenose.



Obrázok 1.1: Štruktúra vlákien

### 1.2.2.1 Jednovidové optické vlákna (Single mode fiber)

Jednovidové vlákna sú v súčasnej dobe v telekomunikáciach jedny z najpoužívanějších. Tieto vlákna sú schopné prenášať len jeden (základný) vid. Túto vlastnosť zaisťuje priemer jadra, ktorý je podstatne menší ako pri mnohovidových optických vláknach (väčšinou sa jedná o  $\varnothing$  9  $\mu\text{m}$ ). Tieto vlákna vykazujú omnoho vyššie prenosové rýchlosti na podstatne dlhších trasách. Podmienka jednovidových vlákien je určená hodnotou normalizovanej frekvencie, ktorá je menšia ako 2,405.

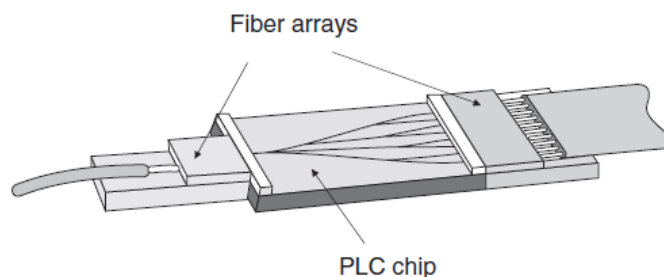
Ich pôvodné využitie bolo prevažne len v chrbtových a metropolitných sieťach, dnes už ich využitie siahá aj do pasívnych optických prístupových sietí, kde môžu prenášať informácie vysokou prenosovou rýchlosťou na vzdialenosti až 20 km. Ako zdroj svetla využíva laser a toto vlákno je drahšie ako mnohovidové.

### 1.2.2.2 Mnohovidové optické vlákna (Multimode fiber)

Mnohovidové optické vlákna prenášajú v jadre vlákna viac ako jeden vid, resp. lúč sa v jadre odráža a šíri sa mnohcestne. Používajú sa na krátke prenosové vzdialenosti len niekoľko km, preto nájdu svoje uplatnenie predovšetkým v LAN sieťach. Priemer jadra je 62,5  $\mu\text{m}$  alebo 50  $\mu\text{m}$  čo je značný rozdiel oproti jednovidovým vláknám. Zdrojom svetla je v tomto prípade LED dióda [23].

### 1.2.3 Pasívne optické rozbočovače (splitter)

Pasívny optický rozbočovač je zariadenie, ktoré jeden privedený optický signál z jedného optického vlákna, rozdelí pre viacero účastníkov pripojených v optickej prístupovej sieti. Pasívne optické rozbočovače majú viac výstupov, preto sa signál delí v pomere 1:N, kde N je počet výstupov s optického rozbočovača. Najčastejšie používané pomery sú 1:2, 1:3, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, no často používané sú aj rozbočovače s pomerom 1:64 a stretávame sa aj s rozbočovačmi s pomerom 1:128. Pri nových pasívnych optických sieťach sa najčastejšie stretneme s pomerom 1:64. V posledných rokoch, bolo značné zlepšenie spoľahlivosti, ceny za port, vložný útlm a rozdeľovací pomer, bol demonštrovaný s rozbočovačmi založenými na PLC rozbočovačmi. Planar Lightwave Circuit je založený na planárnom substráte, typický vyrobený z kremíka alebo kremeňa, na vytvorenie kaskády Y-výstupov [19]. Vnútna štruktúra PLC je zobrazená na Obr. 1.2 [19].



Obrázok 1.2: Štruktúra PLC splittra

### 1.2.4 Optické konektory

Optické konektory sú súčiastky, ktoré slúžia na spájanie optických vlákien, bez optických zvarov. Ich najdôležitejším parametrom je vložný útlm, ktorý by u kvalitných konektoroch nemal presiahnuť hodnotu 0,5 dB, avšak pri nedôslednom zhotovení konektora môže útlm dosiahnuť hodnoty až 10 dB, z toho vyplýva, že konektory môžu značne ovplyvniť parametre optických trás.

Ďalším dôležitým parametrom je typ úpravy konca optického vlákna, ktorý má vplyv na hodnotu útlmu odrazu. Čím vyšší je útlm odrazu, tým je optický konektor kvalitnejší. Straight-polished connector (SPC), je konektor v ktorom je koniec vlákna leštený kolmo na os. Angle-polished connector (APC), je konektor v ktorom je koniec vlákna leštený pod 8 stupňovým uhlom. Podľa mechanického prevedenia sú k dispozícii konektory, šróbovacie, zaskakovacie a zacvakovacie. Najčastejšie používané konektory v optických prístupových sieťach sú konektory FC, SC, LC a ST [26].

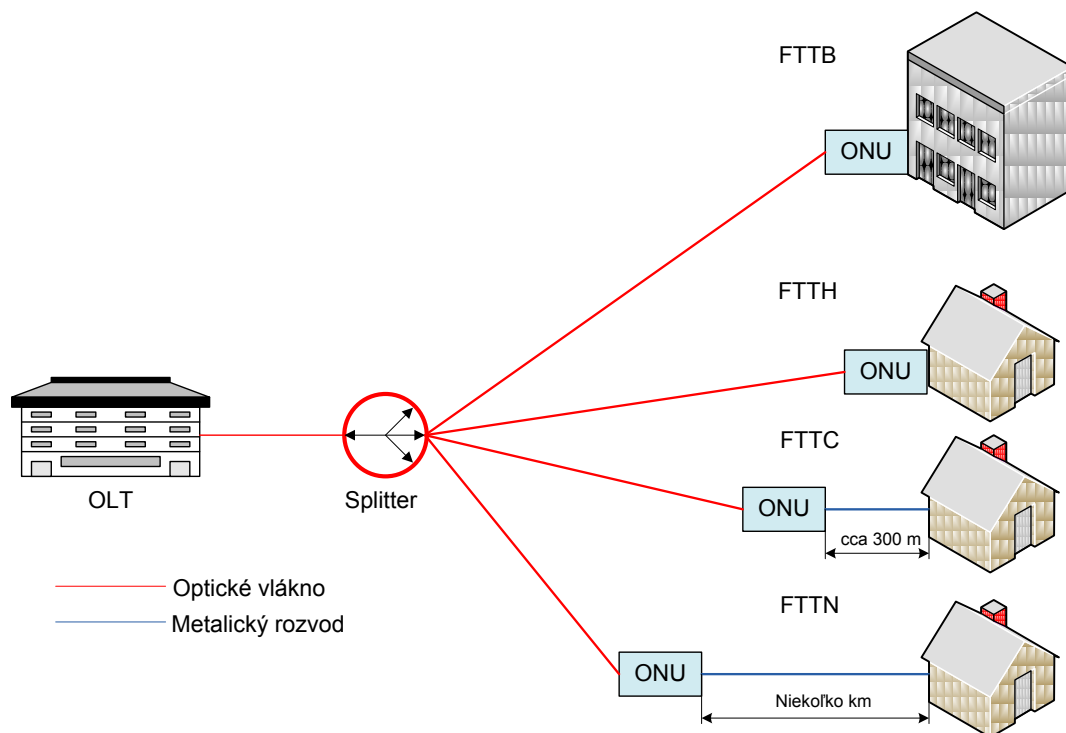


## 2 Sieťe typu FTTx

Podľa názvu rôznych variant FTTx určujeme, kde je optické vlákno ukončené a ďalej pokračuje metalické vedenie. Tento spôsob sa robí kvôli tomu, že nie je finančne výhodné vyviesť optické vlákno až ku konečnému užívateľovi. Podľa tohto ukončenia rozlišujeme rôzne typy optických prístupových sietí a tými sú (Obr. 2.1):

- FTTN (Fiber to the Node) – vlákno je ukončené v distribučnom kabinete, zvyčajne uzol na ulici, niekoľko km od účastníkov. Môže pripojiť až niekoľko stoviek účastníkov pomocou metalického alebo koaxiálneho vedenia,
- FTTC (Fiber to the Curb) – veľmi podobné ako FTTN avšak vzdialenosť od užívateľov je obvykle 300 m. Koncové body sa pripájajú pomocou krútených rozvodov alebo koaxiálnych káblov. Táto architektúra pripája menší počet užívateľov,
- FTTB (Fiber to the Building) – vlákno je ukončené až v budove, kde je na to vyhradený priestor, zvyčajne suterén panelových domov. Od rozvádzača sú účastníci (jednotlivé byty) pripojení metalickými káblami (v rámci budovy),
- FTTH (Fiber to the Home) - vlákno je ukončené priamo už v dome alebo v byte u zákazníka. To zákazníkom ponúka vyššie prenosové rýchlosti, až 1Gb/s, vďaka tomu, že metalické vedenie je minimálne.

Okrem uvedených architektur sa používajú aj ďalšie a to sú napríklad Fiber to the Office, Fiber to the Exchange, Fiber to the Premises. Rozdiely sú len v uložení rozvodne resp. vzdialenosti od užívateľa.



Obrázok 2.1: *Architektúra FTTx*

## 2.1 P2P a P2MP optické siete

Optické prístupové siete rozdeľujeme podľa použitých prenosových prostriedkov v distribučnej časti siete na dve časti:

- P2P (Point-to-Point)
- P2MP (Point-to-Multipoint)

Optické prístupové prostriedky ďalej delíme tak, ako je znázornené na Obr. 2.2 [28].

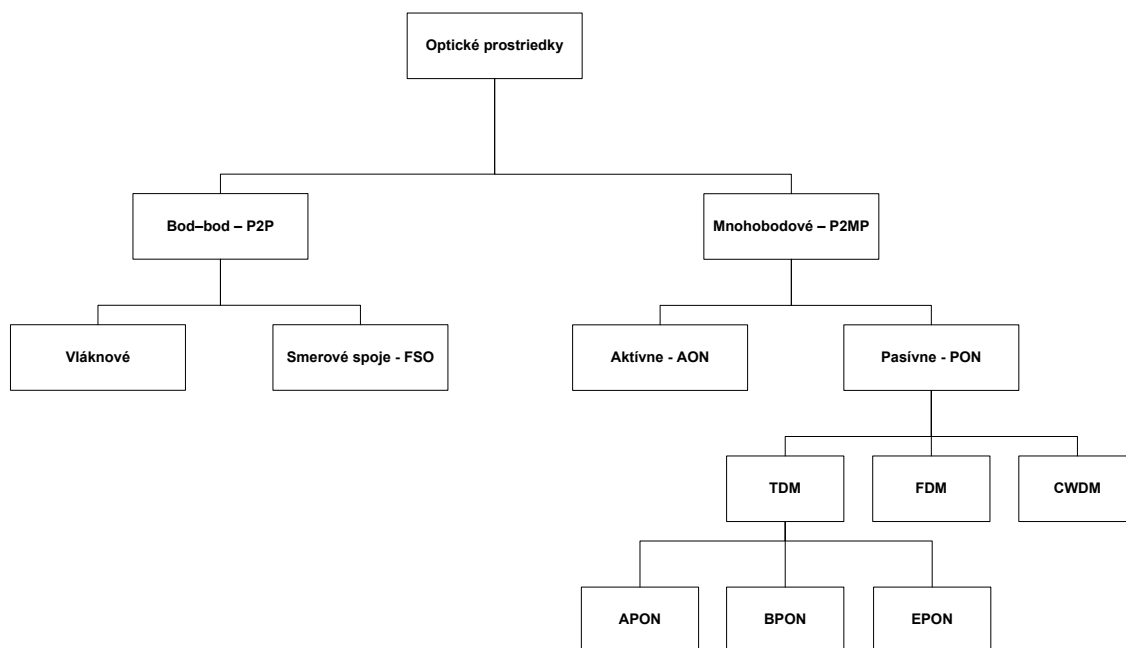
### 2.1.1 P2P

Princíp spočíva v tom, že každý užívateľ je pripojeným optickým vláknom až priamo na optický port ústredne (OLT). Toto riešenie zabezpečuje veľkú šírku pásma a vysoké prenosové rýchlosti, čo je síce obrovská výhoda, avšak zároveň je toto riešenie vysoko nákladné keďže vlákno je vyvedené až ku koncovému spotrebiteľovi.

### 2.1.2 P2MP

Princíp spočíva v pripojení viacerých užívateľov na jedno optické vlákno. Tým sa redukuje náklady na výstavbu siete, keďže nie je potrebné také množstvo optických vlákien ako

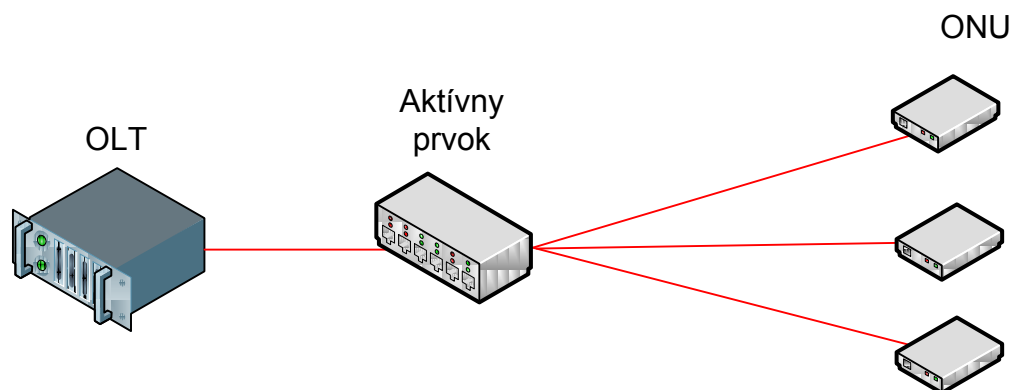
pri P2P sieťach. Najčastejšie sú tieto siete realizované ako PON, kde použijeme pasívny optický rozbočovač na zdieľanie jedného vlákna pre viac koncových bodov.



Obrázok 2.2: Rozdelenie optických prostriedkov

## 2.2 Aktívna optická sieť (AON)

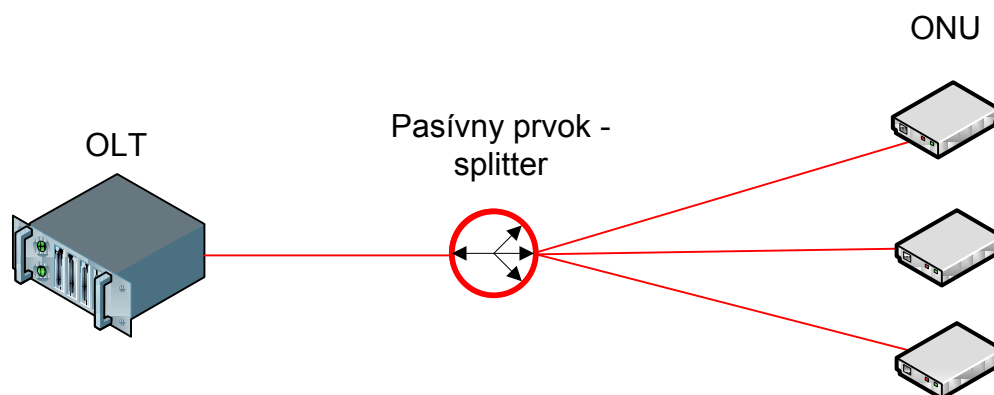
Aktívna optická prístupová sieť využíva na trase medzi ONU a OLT aktívny sieťový prvok, ktorými môžu byť prepínače, rozbočovače, multiplexory resp. demultiplexory (Obr. 2.3). Aktívne siete tvoria základ tzv. hybridných sietí, kde na nižšie časti nadväzujú iné technológie ako sú napr. xDSL alebo CATV. Hlavnou výhodou AON sietí je vyšší rozbočovací pomer a podstatne vyššie dosiahnuté vzdialenosti ako pri PON sieťach. Nevýhodou je napájanie aktívnych sieťových prvkov. S tým nastávajú aj zvýšené náklady na realizáciu takýchto sietí.



Obrázok 2.3: Schéma zapojenia aktívnej optickej siete

## 2.3 Pasívna optická sieť (PON)

Pasívna optická sieť je sieť, ktorá nesie dáta v optickej sieti medzi OLT a ONU alebo ONT a transportná cesta optického signálu je pasívna (Obr. 2.4). To znamená že, optické sieťové zariadenia (zariadenia medzi vysielateľom a prijímačom) nemajú napájanie resp. nie sú použité elektrické zariadenia [18].



Obrázok 2.4: Schéma zapojenia pasívnej optickej siete

Medzi OLT a ONU sa používa pasívny optický rozbočovač tzv. splitter, ten signál rozdeľuje v takom pomere v akom je daný splitter zostrojený. Splitter signál nezosilňuje ani neopakuje. PON kvôli nevyužitiu aktívnych sieťových prvkov je prenosová vzdialenosť len 20 km, avšak pasívne prvky zaisťujú väčšiu odolnosť voči chybám čo vedie k zníženiu nákladov na

prevádzku. PON siete by sme mohli rozdeliť na dva základné typy z hľadiska využitých multiplexorov v pasívnych optických rozbočovačoch [19]:

- TDM – PON - využíva pasívny rozbočovač ako ovládací prvok. Signály z OLT sú v splittroch broadcastovo rozosielané do všetkých ONU. Signály pre rôzne ONU sú namultiplexované v časovej oblasti. ONU rozoznávajú data určené pre nich z adresy obsiahnutej v signáli. Do tejto kategórie spadajú APON, BPON, G-PON,
- WDM - PON – používa WDM spojku ako ovládací prvok. Signály pre rozličné ONU sú prenášané na rôznych vlnových dĺžkach a WDM spojku nasmerované do príslušnej ONU. Odkedy ONU prijímajú iba vlnové dĺžky určené priamo im sa stali WDM-PON bezpečnejšie a lepšie škálovateľné. Bohužiaľ WDM spojky sú podstatne drahšie ako TDM splittre a to ich robí v súčasnosti nezaujímavými.

PON siete môžeme nájsť v štyroch rôznych topológiach:

- Stromová,
- chránená kruhová - pre obchodné použitie,
- zbernicová – univerzitné účely,
- hviezdicová – neobvyklé usporiadanie.

### 2.3.1 Burst módoý optický prenos v TDM pasívnych sieťach

V TDM pasívnych optických sieťach používajú všetci účastníci rovnakú vláknovú infraštruktúru. V zostupnom smere sú dátové pakety broadcastovo rozosielané do všetkých ONU jednotiek. OLT vysielateľ a ONU prijímateľ pracujú v nepretržitom režime, kde je synchronizácia udržiavaná v každom okamihu. Dokonca aj keď sa neposielajú žiadne dáta do ONU jednotiek, OLT vysielateľ musí posielateľ nečinnú bitovú vzorku, takže prijímateľ ONU jednotky môže nepretržite obnovovať časovač zo zostupného signálu. Avšak v vzostupnom smere musia všetci účastníci zdieľať kanál za použitia TDMA. V vzostupnom smere musí byť zabránené kolízii paketov, tak že v danom okamihu sa môže iba jeden paket odoslaný z ONU jednotky dostať až do OLT. OLT koordinuje prenos pre a rozvrhuje prenosový čas pre každú ONU jednotku. Keď chce ONU jednotka posielateľ dáta do OLT, pošle zhuk dát v čase v ktorom má od OLT povolené vysielateľ a potom úplne vypne vysielateľ aby sa predošlo kolízii s vysielaním iných ONU jednotiek vzostupnom smere. Zhukové dáta od rôznych ONU jednotiek, ktoré po sebe nasledujú, sú od seba oddelené určitým časom, po ktorého dobu musia ONU jednotky čakať. Burst-módoý prenos je kľúčovou technológiou pre TDM pasívne

optické siete, v ktorých burst-módový vysielateľ v každej ONU jednotke a burst-módový prijímač v OLT sú nevyhnutné. Burst-módový prijímač v OLT je požadovaný kvôli rozličným vstupným rozsahom a kvôli rýchlej rezervácii času pre ONU jednotky. Na druhej strane, vysielateľ umiestnený na užívateľskej strane musí preukázať veľmi rýchlymi spúšťacími časmi. Návrh vysoko rýchlostných burst-módových optických vysielateľov je nevyhnutný pri nasadzovaní pasívnych optických sietí [12].

### 2.3.2 APON

Pasívna optická sieť založená na ATM sieťovej technológii. Práce na tejto technológii začalo konzorcium FSAN a je štandardizovaná doporučením ITU-T G.983. K transportu využíva ATM bunky. V zostupnom smere sa prenáša 56 ATM buniek s pevne danou dĺžkou 53 bajtov. 54 buniek je užívateľských 2 sú PLOAM služobné bunky. V vzostupnom smere sa prenáša 52 užívateľských buniek taktiež s pevne danou dĺžkou 53 bajtov s 3 bajtovou pridanou hlavičkou priradenou k ATM alebo PLOAM bunkám. Prenosové médium sa skladá z jedného alebo dvoch mnohovidových vlákien. Pri prenose jedným vláknom je zaistená komunikácia vlnovým delením (dopredný smer: 1480-1580 nm; spätný smer 1260-1360 nm) [19].

APON ponúka dve varianty služieb:

- Symetrickú s rýchlosťami 155,52 Mbit/s,
- nesymetrickú s rýchlosťou 622,08 Mbit/s v doprednom smere a 155,52 Mbit/s v spätnom smere.

### 2.3.3 BPON

Broadband PON je založený na ATM pasívnej optickej sieti. Maximálna vzdialenosť medzi ONU a OLT je 20 km. V prípade dvoch využitých vlákien pracuje BPON na vlnových dĺžkach v rozmedzí 1260 – 1360 nm. V prípade jedného vlákna sa v zostupnom smere využívajú vlnové dĺžky 1480 – 1580 nm.

### 2.3.4 GPON

Gigabit PON je technológia podobná technológii EPON, avšak tieto dve technológie nie sú vzájomne kompatibilné. Pre prenos využíva ATM bunky. Prenosové rýchlosti sú symetricky 1,244Gbit/s alebo 2,488 Gbit/s. Ďalej sú implementovateľné aj prenosové rýchlosti 155,52 Mbit/s alebo 622,02 Mbit/s v oboch smeroch, ale tieto sa v praxi zvyčajne nevyužívajú. Pre prenos sa využívajú vlnové dĺžky:

- 1480 – 1550 nm v vzostupnom smere,
- 1260 – 1360 nm v zostupnom smere.

### 2.3.5 10GEPON

Je založená na Ethernetových rámcoch podobne jako EPON, avšak prináša zmeny v prenosových parametroch. Je spätne kompatibilná s technológiou EPON a to sa dá dosiahnuť výmenou modulov na strane OLT a zároveň výmenou ONU jednotiek na strane účastníka dostanú zákazníci vyššie prenosové rýchlosti. Navyše je 10GEPON kompatibilná s WDM-PON technológiami. Prenosové rýchlosti dosiahnuté technológiou 10GEPON sú:

- Symetricky 10 Gbit/s pre oba smery,
- nesymetricky 10Gbit/s v zostupnom smere a 1Gbit/s v vzostupnom smere.

### 2.3.6 WDM-PON

Wavelength Division Multiplex – PON je ktorá využíva vlnové delenie a umožňuje paralelne prenášať po jednom optickom vlákne niekoľko navzájom oddelených vlnových dĺžok a tým znásobiť jeho celkovú kapacitu. WDM sa delí na varianty hrubého CWDM (Coarse WDM) a hustého DWDM (Dense WDM) vlnového delenia podľa vzájomného odstupu vlnových dĺžok.

CWDM definuje jednotlivé kanály s prvou nosnou 1270 nm a poslednou 1610 nm. Odstup medzi nosnými je 20 nm a tolerancia nosnej je  $\pm 6,5$  nm.

DWDM využíva menšiu rozteč medzi jednotlivými kanálmi a dosťahuje nižšiu toleranciu vlnovej dĺžky jednotlivých nosných. To dovoľuje umiestniť v rovnakom pásme podstatne väčšie množstvo vlnových dĺžok, typicky 32, 64 až 96 v jednom uvažovanom pásme [15].

### 3 EPON

Ethernetové pasívne optické siete sú prístupové siete, ktoré poskytujú lacnú technológiu optických liniek medzi OLT a zákaznickou stranou. EPON je založená na štandarde ITU-T G.983 pre ATM pasívne optické siete a prináša do života FSAN, ktoré prenášajú data, video a hlas cez jeden optický prístupový systém [5].

Koncept EPON bol vyvinutý v IEEE ako štandard 802.3ah a nesie označenie prvej míle (Ethernet in the First Mile), ktorá mala za úlohu vytvoriť koncept a štandard vysokorýchlostného prístupu založeného na rozhraní Ethernet.

EPON rieši mnoho nevýhod sietí typu APON, ktorými boli nedostatočná šírka pásma, zložitosť a nákladnosť. Taktiež rieši problém s prechodom medzi WAN a LAN sieťami, kde pri APON sieťach musela byť prevedená konverzia medzi ATM a IP protokolmi. Napriek tomu je architektúra týchto dvoch sietí veľmi podobná. Poskytovatelia sa zväčša zameriavajú na riešenia typu FTTB a FTTC, no v neposlednom rade aj na riešenie FTTH so širokým výberom služieb pre užívateľov.

IEEE 802.3 štandard definuje dve základné konfigurácie Ethernetovej siete. Jedna konfigurácia je s využitím CSMA/CD protokolu po zdieľanom médiu. Ďalšia konfigurácia je taká, že koncové stanice sú pospájané switchmi a využívajú plne duplexné spojenie s architektúrou bod-bod. Vlastnosti EPON sú také, že nemôže byť použité buď zdieľané médium alebo bod-bod sieť, využíva sa spojenie oboch týchto spôsobov komunikácie.

#### 3.1 Štruktúra Ethernetového rámca

Prenos dát v sieťach EPON je zabezpečený Ethernetovým rámcom, ktorý je definovaný štandardom IEEE802.3. Štruktúra Ethernetového rámca je zobrazená na Obr. 2.5.

Preambula	SFD	MAC cieľa	MAC zdroja	802.1Q	Typ/dĺžka	Dáta	FCS	Medzera medzi rámcami
7 oktetov - 10101010	1 oktet - 10101011	6 oktetov	6 oktetov	4 oktety	2 oktety	46 -1500 oktetov	4 oktety	12 oktetov
		64 – 1522 oktetov						
72 – 1530 oktetov								
84 – 1542 oktetov								

Obrázok 3.1: Štruktúra Ethernetového rámca



Popis jednotlivých polí [9]:

- Preambula – synchronizácia hodín príjemcu,
- SFD (Start of Frame delimiter) - označenie začiatku rámca,
- MAC cieľa – adresa cieľového sieťového rozhrania s dĺžkou 48 bitov; môže byť individuálna (unicast), skupinová (multicast) a všeobecná (broadcast),
- MAC zdroja – adresa zdrojového sieťového rozhrania,
- 802.1Q – nepovinná časť, definuje virtuálnu sieť VLAN,
- Typ/dĺžka – pre Ethernet II pole určuje typ vyššieho protokolu, pre IEEE 802.3 udáva dĺžku poľa dát,
- Dáta – obsah prenášaných dát; pole dlhé minimálne 46 a maximálne 1500 oktetov, minimálna dĺžka je nutná pre správnu detekciu kolízií v rámci segmentu
- FCS (Frame Check Sequence) – kontrola správnosti dát, kontrolný súčet.

### **3.2 Transportná vrstva**

Transportný protokol sietí EPON je postavený na štruktúre Ethernetového rámca a využíva metódu TDM v smere k užívateľovi a metódu TDMA v smere od užívateľa. Prenosová rýchlosť je symetricky 1 Gbit/s, výsledná rýchlosť je 1,25 Gbit/s (0,25 Gbit/s je réžia) pri využití 8B10B blokového kódovania.

Prenos využíva Ethernetové rámce, kde každá ONU prijíma len tie rámce ktoré sú adresované jej. V vzostupnom smere je ONU jednotke priradený časový slot, behom ktorého môže vysielat' svoje rámce. ONU jednotky sú identifikované špeciálnym tagom s dĺžkou 2 byty. Tento tag sa nazýva LLID.

EPON využíva v zostupnom smere vlnovú dĺžku 1490 nm a v vzostupnom smere je to 1310 nm. Vlnová dĺžka 1510 nm je teda pre prídavné služby ako WDM siete a CATV siete.

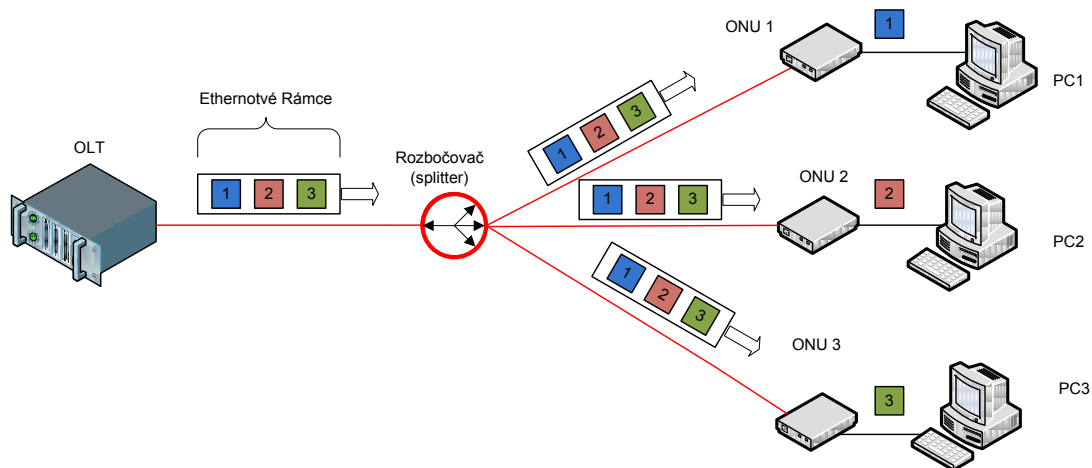
PMD vrstva definuje dve varianty prenosu:

- Do 10 km – 1000BASE-PX10-D/U
- Do 20 km - 1000BASE-PX20-D/U

#### **3.2.1 Zostupný smer**

Data sú broadcastovo odosielané z OLT do ONU s premenlivou dĺžkou paketov, ktorá je vyššia ako 1518 bytov podľa Ethernetového protokolu IEEE 802.3. Každý paket obsahuje hlavičku, v ktorej sú jednoznačne identifikované data pre ONU. Niektoré pakety môžu byť

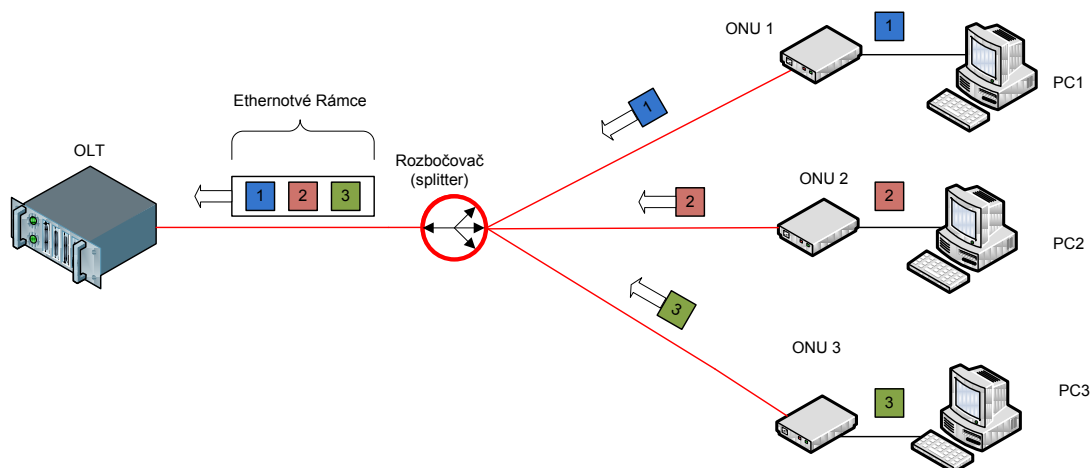
určené pre všetky ONU (broadcast) alebo pre vyčlenenú skupinu ONU (multicast). V optickom rozbočovači je signál rozdelený a ďalej putuje k jednotlivým ONU. Keď do ONU dorazí signál, prijme iba tie pakety, ktoré sú určené jej a ostatné pakety, ktoré sú určené pre iné jednotky zahodí (Obr. 3.2).



Obrázok 3.2: EPON – zostupný smer

### 3.2.2 Vzostupný smer

V vzostupnom smere je prenos riadený technológiou TDM, kde sú pre jednotky vyčlenené časové úseky, po ktorej dobu môžu vysielat'. Časové úseky sú zosynchronizované, tak aby nenastala kolízia, čiže sa tieto úseky neprekrývajú (Obr. 3.3).



Obrázok 3.3: EPON – vzostupný smer

### 3.3 Multi-Point Control Protocol

Prevádzka v vzostupnom smere vyžaduje riadenie a to je dosiahnuté MPCP protokolom. Je to protokol, ktorý využíva 64 bytové MAC kontrolné správy. MPCP zahŕňa správy pre pridelenie šírky pásma, nastavenie parametrov, manažment a registráciu ONU jednotiek.

Tento protokol je postavený na dvoch Ethernetových správach: GATE a REPORT. GATE správy sa využívajú pre priradenie prenosových timeslotov a sú posielané z OLT do ONU. REPORT správy sú odosielané jednotkami ONU do OLT a prenáša informácie o stave jednotiek [5].

MPCP operuje v dvoch módoch:

- Múd automatického detekovania a inicializácie – detekuje novo pripojené ONU jednotky a získava od nich MAC adresy a Round-Trip Time (RTT),
- normálny mód – používa sa pre priradenie prenosových možností všetkým inicializovaným ONU jednotkám.

Priebeh automatickej inicializácie postupuje v týchto krokoch [5]:

1. OLT vymedzí časový interval v ktorom nemôžu vysielat' žiadne už inicializované ONU jednotky,
2. OLT zašle inicializačnú GATE správu, ktorá obsahuje počiatočný čas inicializačného úseku a jeho dĺžku,
3. len neinicializované jednotky môžu odpovedať na GATE správu. Po prijatí inicializačnej GATE správy, ONU jednotka si nastaví čas podľa prijatej časovej značky obsiahnutej v GATE správe,
4. keď hodiny usmiestnené v ONU jednotke získajú počiatočný čas inicializačného úseku získaného z GATE správy, ONU jednotka pošle REPORT správu. REPORT správa obsahuje zdrojovú adresu ONU jednotky a časovú značku reprezentujúcu čas odoslania REPORT správy z ONU jednotky podľa jej hodín,
5. keď OLT prijme správu REPORT od neinicializovanej ONU jednotky, zistí MAC adresu a RTT (rozdiel medzi časom kedy bola správa REPORT odoslaná a prijatá).

Viac ONU jednotiek môže odpovedať na jednu inicializačnú GATE správu, pri odosielaní REPORT správy môže nastať kolízia. V takom prípade, ONU jednotky, pri ktorých nastala kolízia REPORT správ, nezískajú žiadny úsek na ich normálnu prevádzku. Ak ONU jednotka

neprijme slot assingment v rámci nejakého časového intervalu, vyvodí sa z toho, že kolízia nastala a opäť sa pokúsi inicializovať až po náhodnom počte inicializačných GATE správ.

Funkcia MPCP protokolu v normálnom operačnom móde [5]:

1. Z vyššej vrstvy (MAC control klienta), MPCP dostane požiadavku na prenos GATE správy do konkrétnej ONU jednotky s nasledujúcimi informáciami: čas kedy môže ONU jednotka začať vysielat' a trvanie vysielania,
2. MPCP vrstva (v OLT a v každej ONU) spravuje hodiny. Po prijatí GATE správy z vyššej vrstvy, zariadenie si označí MPCP správu svojou vlastnou značkou s časom zariadenia,
3. po prijatí GATE správy so zodpovedajúcou MAC adresou ONU jednotky, ONU jednotka si nastaví svoje lokálne registre na čas začiatku a dĺžku vysielania. ONU jednotka si skontroluje či čas prijatej GATE správy je približný časovej značke obsiahnutej v správe. Ak rozdiel v týchto dvoch hodnotách prekračuje určitú preddefinovanú dobu, ONU jednotka bude predpokladať, že sa rozsynchronizovali a sama sa prepne do neinicializovaného módu. V neinicializovanom móde nemá jednotka umožnené vysielanie a ďalej bude len sledovať prevádzku a čakať na ďalšiu inicializačnú GATE správu na vykonanie inicializácie,
4. v prípade ak čas medzi prijatou GATE správou a časovou značkou v nej obsiahnutou je približne rovnaký, tak jednotka si aktualizuje hodiny na čas uvedený v časovej značke. Ak lokálny čas dosiahne hodnoty na začiatok vysielania, tak ONU jednotka začne prenos. Prenos môže obsahovať väčší počet Ethernetových rámcov. ONU zaistí aby žiadne rámce neboli fragmentované. Ak sa rámec, ktorý je ďalší v poradí nezmestí do časového slotu vysielania, tak bude podržaný až do ďalšie časového úseku.

REPORT správy sú posielané ONU jednotkami v pridelenom prenosovom okne spoločne s dátovými rámcami. Správy REPORT môžu byť posielané automaticky alebo na požiadanie a sú generované na vrstve MAC control klienta a majú časovú značku v MAC riadení. Obvykle by REPORT správa mala obsahovať požadované číslo ďalšieho časového úseku založenom na čísle vo fronte ONU jednotiek. Keď vyžaduje časový úsek, ONU jednotka by sa mala prihlásiť prídavnou hlavičkou, menovite 64-bitovou preambulou a 96-bitov IFG súvisiace s každým rámcem.

Keď REPORT správa s časovou značkou dorazí do OLT, je ďalej podaná na MAC vrstvu za rozhodovanie pridelenej šírky pásma. Dodatočne, OLT prepočíta RTT čas pre zdrojovú ONU

jednotku. Malá odchýlka nového RTT od predošlého nameraného RTT môže byť spôsobená zmenami v indexe lomu vlákna zodpovedná za teplotné zmeny. Na veľkú odchýlku by mala OLT upozorniť ONU jednotky o potenciálnom rozsynchronizovaní a mala by zabrániť OLT pred ďalším povelním vysielania tej jednotke až dokým sa znovu neinicializuje [5].

### **3.4 Burst módomý pracovný režim**

V kapitole 2.3.1 bol opísaný prenos v burst móde, ktorý bol pozorovaný v vzostupnom smere na PON sieti, kde veľa ONU jednotiek zdieľalo pre prenos jedno optické vlákno. Kvôli vzostupnému burst prenosu bolo nutné aby PON kontrolovala dobu zapnutia a vypnutia laserov jednotlivých ONU jednotiek. OLT prevzala kontrolu nad úpravou a časovaním tohto procesu. Obr. 3.4 [12] ukazuje efekt týchto parametrov na efektívnosť prenosu v vzostupnom smere.

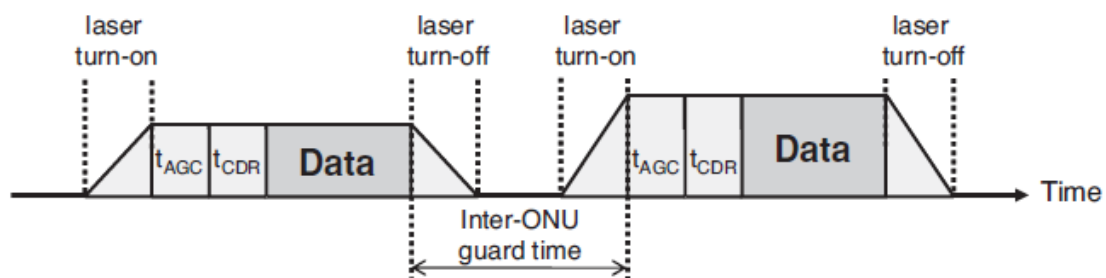
Čas kontroly zahŕňa čas, kedy predchádzajúca ONU jednotka vypne laser a následujúca ONU laser zapne, malú toleranciu pre posun v čase medzi sebou idúcimi vysielajúcimi ONU a čas, ktorý OLT potrebuje na upravenie úrovne zosilnenia AGC a znovunastavenie hodín súčasne. Pre nájdenie začiatku vysielaných dát sa používa buď oddeľovač (GPON sieť), alebo zarovnanie kódu skupiny (EPON sieť).

Technológia EPON zvolila voľnú sadu parametrov, ktorá sa nachádza v štandardnom tele (napr. čas zapnutia laseru = čas vypnutia laseru = 512 ns a úprava zisku alebo čas na zotavenie hodín  $\leq 400$  ns). Na druhej strane technológia GPON alokuje len 32 bitov (25,7 ns) ako čas zapnutia a vypnutia laseru a veľmi striktných 44 bitov (34,5 ns) pre úpravu úrovne zosilnenia a znovunastavenie hodín). Kompromis je, že rýchly AGC okruh nebude schopný podporovať tak široký dynamický rozsah ako pomalší AGC okruh. Tým pádom, GPON núti vzdialenejšie ONU aby potlačili vysielač výkon za účelom zníženia dynamického rozsahu prijímaného OLT.

Aby bola zachovaná rýchla úprava zosilnenia, dynamický rozsah vstupného signálu musí byť limitovaný. Výsledkom je, že rozdielna vzdialenosť medzi najbližšou a najvzdialenejšou ONU je limitovaná, čo zabezpečuje, že AGC okruh môže fungovať v rámci špecifického času na úpravu zosilnenia.

Tieto parametre sú vybrané aby splnili rozličné požiadavky na stavbu siete. IEEE EPON zvyčajne trvá na čo najúspornejších opatreniach, na druhej strane technológie ako ITU-T BPON a Gpon idú cestou agresívnejších vlastností, ktoré zabezpečujú maximálnu efektívnosť a výkon

siete (napr. 100% využitie šírky pásma, menšie burst-mode režijné náklady, zostavenie paketov a fragmentácia a rozsah vyšších výkonov) [12].



Obrázok 3.4: Efektívnosť preosu v vzostupnom smere

## 4 Optické zosilňovače

Prenosová vzdialenosť akéhokoľvek optovláknového komunikačného systému je limitovaná stratami vo vlákne. Pre ďalekosiahle systémy, obmedzenia spôsobené stratami bývajú prekonané optoelektrickými opakovačmi, v ktorých sa signál najskôr prekonvertuje na elektrický prúd a potom sa regeneruje vo vysielači. Tým sa stávajú regenerátory vcelku náročnými a drahými pre WDM optické systémy. Alternatívou je použitie optických zosilňovačov, ktoré zosilňujú priamo optický signál bez toho aby musel byť prevedený na elektrický prúd. Prvé optické zosilňovače boli skonštruované v priebehu 80.tých rokov, a použitie optických zosilňovačov pre ďalekosiahle systémy sa stalo rozšíreným až v priebehu 90.rokov [1].

V tejto kapitole popíšem dva základné typy optických zosilňovačov: Zosilňovače s dopovaným vláknom (DFA) a Ramanove zosilňovače. Tieto dva typy využívajú ako hlavný prvok na zisk vlákno. DFA zosilňovače v optických komunikačných sieťach pracujú v C a L pásmach. Erbium dopovaný vláknový zosilňovač (EDFA) využíva špeciálne skonštruované vlákno ako zosilovacie médium, kdežto Ramanov zosilňovač využíva samotné prenosové vlákno [13].

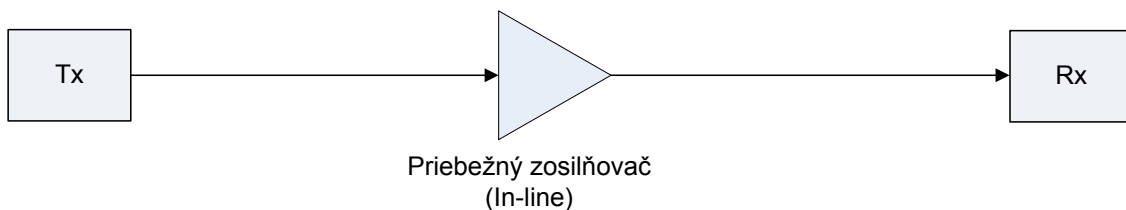
### 4.1 Aplikačné využitie optických zosilňovačov

Optické zosilňovače našli široké uplatnenie nielen v ďalekosiahlych systémoch ale tiež v multiprístupových sieťach (siete kde je optický signál rozdelený k veľkému počtu užívateľov) kvôli kompenzácií strát spôsobených delením. Funkcie optických zosilňovačov viedli k mnohým rozličným využitiam, kde každé z nich má rozličné konštrukčné požiadavky.

### 4.2 Rozdelenie zosilňovačov podľa umiestnenia na telekomunikačnej trase

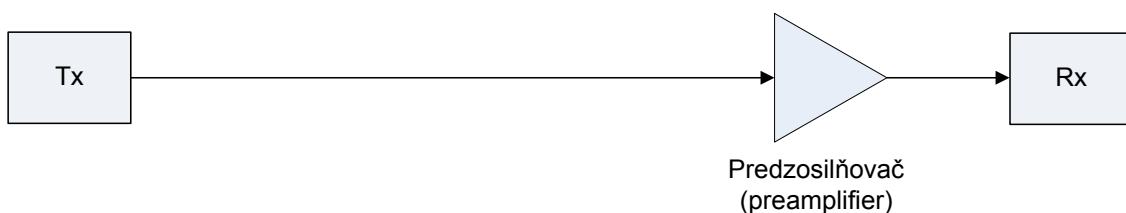
Optické zosilňovače delíme podľa umiestnenia na telekomunikačnej trase do troch kategórií:

1. Optické linkové zosilňovače(In-line optical amplifiers). V jednomódových linkách, účinky vláknovej disperzie môžu byť malé, v tom prípade je hlavným obmedzením útlm vlákna. Pretože takáto linka nutne nevyžaduje kompletnú regeneráciu signálu, osadenie takýchto zosilňovačov periodicky pozdĺž trasy bude dostačujúce. Preto môže byť optický zosilňovač použitý na kompenzáciu prenosových strát a zvýšenie vzdialenosti medzi regeneračnými opakovačmi. Priebežný zosilňovač je na Obr. 4.1.



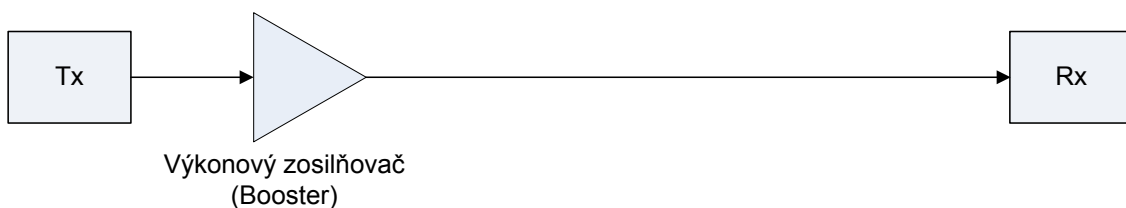
Obrázok 4.1: *Pribežný zosilňovač*

2. Predzosilňovač (Preamplifier). Používa sa ako koncový zosilňovač pred optickým prijímačom. Slabý optický signál je zosilnený pred dopadom na fotodetektor prijímača, a keďže tento zosilňovač má nízky vlastný šum, tak zlepšuje odstup signálu od šumu signálu a tým sa zníži bitová chybovosť takéhoto spoja. Predzosilňovač je na Obr. 4.2.



Obrázok 4.2: *Predzosilňovač*

3. Pozosilňovač (Postamplifier/Booster). Umiestnenie zosilňovača ihneď za optickým vysielačom zvyšuje úroveň svetla hneď na začiatku optickej trasy. Jeho úlohou je optimalizovať naviazaný výkon do vlákna a umožniť tak vlákno vybudiť na maximálnu možnú úroveň. Avšak, maximálna úroveň môže byť len taká, aby nedošlo k vzniku nelineárnych javov. Má veľmi veľký výstupný výkon, ale nemusí mať veľké zosílenie, pretože je budený dostatočne silným signálom z vysielačnej diódy [29]. Optický zosilňovač zvyšuje prenosovú vzdialenosť z 10 na 100 km v závislosti na zisku zosilňovača a útlme vlákna. Napríklad použitie pozosilňovača spolu s predzosilňovačom umiestneným pred prijímačom, umožňuje kontinuálne podvodné prenosové vzdialenosti v rozsahu 200 až 250 km. Výkonový zosilňovač je na Obr. 4.3.



Obrázok 4.3: *Výkonový zosilňovač*

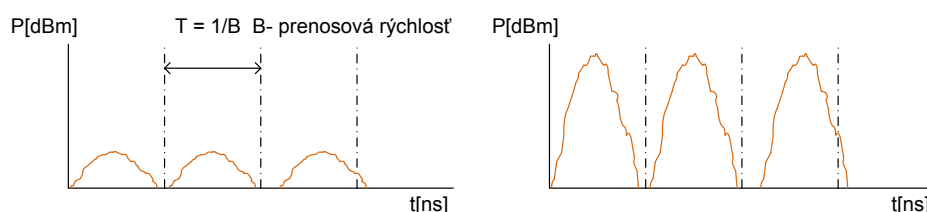


### 4.3 Delenie zosilňovačov podľa spracovania signálu

V tomto delení zosilňovačov sa zohľadňuje spôsob, akým sa spracováva vstupný signál. Vstupný signál nemusí byť len zosilnený, ale môže byť upravený tvarovo aj v časovej oblasti.

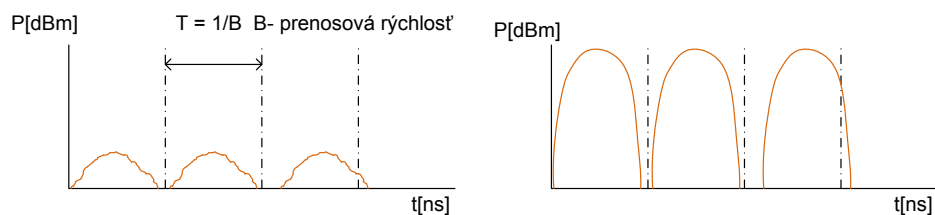
Taktiež sa rozdeľujú do troch kategórií:

1. Kategória 1R. Zosilňovač vstupný signál iba zosíli. Neupravuje tvar signálu, polohu signálu ani fázu (Obr. 4.4). Výhodou týchto zosilňovačov je, že nie sú závislé na type signálu s ktorým pracujú, čím umožňuje použitie rôznych dátových formátov. Do tejto kategórie patria optické zosilňovače.



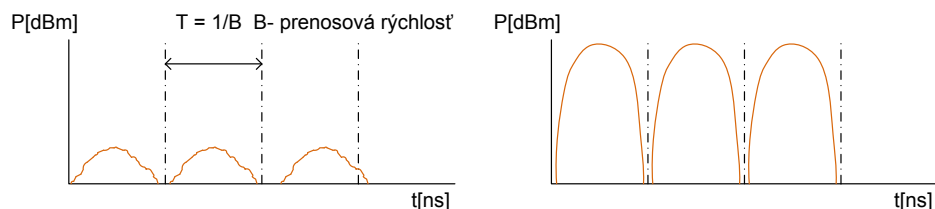
Obrázok 4.4: Zosilnenie signálu zosilňovačom 1R

2. Kategória 2R. Zosilňovač (v tomto prípade sa nazýva regenerátor) signál zosíli a ešte k tomu upravuje aj jeho tvar (Obr 4.5). Signál je ovplyvnený útlmom vlákna a v tom dôsledku sa signál zoslabuje a klesá aj pomer odstupu signálu od šumu. Ďalej je signál ovplyvnený disperziou, ktorá impulz deformuje tvarovo a to tak že ho predlžuje v závislosti na dĺžke vlákna. Následkom týchto javov je obmedzený dosah signálu a taktiež nesprávna interpretácia deformovaných impulzov, čo vedie k zníženiu bitovej rýchlosti a zvýšeniu bitovej chybovosti. Regenerátor prevedie optický signál na elektrický a pomocou komparátoru rozhodne či sa jedná o logickú nulu alebo jednotku. Potom je opäť vytvorený optický signál a späť naviazaný do vlákna. Obnovený signál je takmer presnou kópiou pôvodného signálu vyslaného do vlákna na začiatku trasy, avšak 2R zosilňovač nerieši časovú polohu jednotlivých impulzov.



Obrázok 4.5: Zosilnenie signálu zosilňovačom 2R

3. Kategória 3R. Zosilňovač pracuje obdobne ako zosilňovač kategórie 2R. Prevedie optický signál na elektrický, zosíli ho, upraví jeho tvar a navyše obnoví taktovací kmitočet, čím sa zmení aj časová poloha impulzov (Obr 4.6). Týmto spôsobom sa potlačí aj časová nestabilita.



Obrázok 4.6: Zosilnenie signálu zosilňovačom 3R

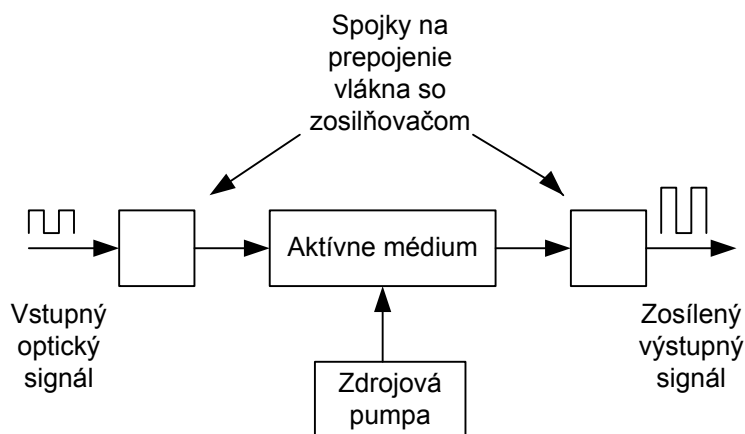
Nevýhodou zosilňovačov, ktoré spadajú do kategórií 2R a 3R, je to, že sú závislé na type signálu s ktorým pracujú. Aby mohli správne pracovať, musia poznať kódovanie a typ signálu, ktorý sa používa na danej komunikačnej trase. Z toho vyplýva aj obmedzenie pri zmene kódovania, ktoré nie je možné bez dodatočnej úpravy zosilňovača z tejto kategórie [29].

#### 4.4 Zosilňovací mechanizmus

Všetky optické zosilňovače zvyšujú výkonovú úroveň náhodného svetla cez proces stimulovanej emisie žiarenia, využitý je rovnaký princíp aký je aj v laseroch. K stimulovanej emisii dochádza keď nejaký externý stimulant, napríklad signálny fotón, spôsobuje, že excitovaný elektrón má vyššiu energetickú úroveň aby klesol do základného stavu. Fotón emitovaný v tomto procese má rovnakú energiu ako náhodný signálny fotón a je s ním vo fázi. To znamená, že produkujú jasnejšie svetlo. Aby mohlo dojsť k stimulovanej emisii, musí nastať populačná inverzia nosných vln, čo znamená, že v excitovanom stave je viac elektrónov ako

v základnom stave. Odkedy toto nie je normálny stav, je dosiahnutá populačná inverzia tým, že dodáva energiu na pumpovanie elektrónov na vyššiu energetickú úroveň.

Pumpovacie techniky môžu byť optické alebo elektrické. Zariadenie absorbuje energiu získanú z externého optického alebo elektrického zdroja nazývaného „pumpa“. Pumpa zásobuje elektróny energiou v aktívnom médiu, ktoré ich dostáva na vyššiu energetickú úroveň kvôli inverzii populácie. Prichádzajúci signálny fotón spustí excitované elektróny aby dosiahli nižšiu úroveň cez proces stimulovanej emisie, čím sa vytvorí zosilnený signál. Jednoduchý schematický náčrt zosilňovača so zdrojovou pumpou je na Obr. 4.7.



Obrázok 4.7: Schematický náčrt zosilňovača s pumpou

Optické vláknové zosilňovače, či už sa jedná o vláknové alebo polovodičové, signál nijako neupravujú, len ho zosilňujú. Avšak oba druhy do trasy pridávajú aj šum tzv. ASE (Amplified Spontaneous Emission). Jedná sa o svetlo vytvorené samovoľnou emisiou, ktoré je zosilnené procesom stimulovanej emisie. ASE preto nepriaznivo vplýva na maximálny zisk [25].

Jeden z najdôležitejších parametrov v optických zosilňovačoch je signálny zisk alebo zisk zosilňovača  $G$ , ktorý je definovaný vzťahom

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (4.1)$$

kde  $P_{in}$  a  $P_{out}$  sú vstupný a výstupný výkon, resp. zosilnený optický signál. Zisk sa zvyčajne meria pri podmienkach nízkej úrovni výkonu signálu ( $P_{out} < 0$  dBm) a je vyjadrený v jednotkách decibelov ako

$$G \text{ dB} = P_{out} \text{ dBm} - P_{in} \text{ dBm}, \quad (4.2)$$

kde vstupný aj výstupný výkon je udávaný v jednotkách dBm [13].

Aby zosilňovač mohol zosilňovať, musí dostať určitú energiu, ktorú poskytuje čerpací zdroj. Existujú dva základné druhy dodanej energie:

1. Optická energia – dodáva sa vo forme žiarenia s koherentnou vlnovou dĺžkou (laserové čerpace zdroje). Tento typ sa využíva v zosilňovačoch s dotáciou vlákna,
2. elektrická energia – dodáva sa vo forme elektrického prúdu. Využitie je v polovodičových zosilňovačoch.

### 4.5 Požiadavky na optické zosilňovače

Optické zosilňovače majú rôzne požiadavky podľa ich umiestnenia na trase. Zosilňovač použitý na konci prenosovej trasy bude mať úplne iné požiadavky ako zosilňovač použitý na začiatku trasy alebo priebežný. Preto určujeme tieto faktory:

- Zisk  $G$  – pomer výstupného výkonu k vstupnému, rozhoduje o dĺžke prekonanej optickej trasy,
- krivka zisku – v ideálnom prípade by mal mať vyrovnanú charakteristiku zosilnenia, aby obnovil všetky vlnové dĺžky s rovnakou účinnosťou,
- vstupný saturačný výkon – schopnosť prijať veľký vstupný výkon optického žiarenia, rozhoduje o vhodnosti použitia zosilňovača na začiatku trasy, hneď za vysielacom
- saturácia zisku – vypovedá o energetickej účinnosti zosilňovača,
- vložný útlm a útlm zosilňovača odpojeného od zdroju energie – v ideálnom prípade by mal povoliť priechod svetla aj bez dodávanej elektrickej energie z čerpaceho zdroja,
- šírka pásma zosilňovača – rozsah vlnových dĺžok, v ktorých je možné vstupný signál zosilniť, rozhoduje o možnosti nasadenia zosilňovačov pri systémoch s vlnovým delením,
- šumové číslo – pomer odstupe signálu od šumu SNR, dôležité pre detekciu slabých signálov a umiestnenie pred prijímačom,
- teplotná stabilita centrálnej vlnovej dĺžky – ovplyvňuje funkčnosť systému s hustým vlnovým delením [20].

### 4.6 Optické zosilňovače s dopovaným vláknom

Vývoj zosilňovačov s dopovaným vláknom viedol k dramatickému zvýšeniu kapacity kanálu v optovláknových komunikáciach a poskytol kľúčové komponenty v mnohých typoch optických zdrojov a zariadení na spracovanie signálov [7].

Zosilňovače s dopovaným vláknom využívajú dopované vlákno ako médium na zosilnenie optického signálu. Vláknó je dopované iontami z prvkov vzácnych zemín a je rozmerovo podobné jednomódovému vláknu. Voľbou dopantu sú ovplyvňované spektrálne závislosti zosilňovača.

Podľa použitého dopovacieho prvku býva odvodený aj názov zosilňovača a najčastejšie používané prvky sú:

- Er (Erbium),
- Nd (Neodymium),
- Pr (Praseodymium),
- Tm (Thulium),
- Yb (Ytterbium).

Pri výrobe je koncentrácia dopantov relatívne malá, pretože pri veľkej koncentrácii dôjde k zhoršeným účinkom zosilňovača alebo k zníženiu zisku. Táto koncentrácia sa pohybuje rádovo v niekoľkých stovkách atómov na milión molekúl základného materiálu.

Tieto prvky majú odlišné vlastnosti. Preto pri výbere optického zosilňovača musíme prizerat', na ktorých vlnových dĺžkach pracujú najoptimálnejšie.

Zosilnenie je dosiahnuté pomocou stimulovanej emisie fotónov z iontov, ktoré boli pridané do optického vlákna. Čerpací zdroj pomocou energie presunie atómy dopantov do vyššej energetickej úrovne. Pri prechode medzi vyššou a nižšou úrovňou dochádza k žiarivému prechodu a dochádza k uvoľneniu fotónu s istou energiou. Prechod môže byť stimulovaný alebo spontánny. Znižovanie účinnosti svetelného zosilňovača je spôsobené spontánnou emisiou a absorpciou elektrónov [25].

Nevýhodou optických zosilňovačov s dopovaným vláknom je vysoká úroveň generovaného šumu, ktorý značne zhoršuje SNR. Najmä použitie týchto zosilňovačov ako predzosilňovač na zosilnenie veľmi slabých signálov je problematické. Generovaný šum by mohol v kritickom prípade nadobudnúť až hodnotu úrovne porovnateľnej s úrovňou signálu.

### **4.6.1 Erbium dopovaný optovláknový zosilňovač (EDFA)**

Erbium je najčastejšie používaným prvkom v zosilňovačoch pre ďalekosiahle telekomunikačné systémy. Aktívne médium v tomto zosilňovači je 10 až 30 m optické vlákno dopované prvkom Erbium. Základný materiál v tomto vlákne je štandardne kremík, sklo na báze

fluoridu alebo viaczložkové sklo. Pôvodne bolo operačné pásmo EDFA zosilňovača obmedzené len na C-pásmo (1525-1565 nm), pretože v tejto oblasti je vysoký koeficient zisku z erbiových atómov. Mimo tejto oblasti zisk rapídne klesá a v L-pásme (1570 – 1610 nm) je zisk len 20 percent zo zisku v C-pásme. Avšak inovácie v návrhoch erbiom-dopovaného vlákna a použitie vysoko-energetických čerpacích zdrojov pracujúcich na vlnových dĺžkach, ktoré sú odlišné od tých používajúcich C-pásmové čerpace zdroje, umožnili rozšírenie EDFA zosilňovačou aj na L-pásmo.

Navyše, kombinácia zosilňovača EDFA a Ramanovho zosilňovača pre L-pásmo, vznikol hybridný zosilňovač, ktorý dokáže zvýšiť zisk v oblasti od 1531 nm do 1616 nm o 3dB v 75nm šírke pásma [13].

Bežne sa používajú dva rôzne zosilňovače, každé optimalizované pre jedno pásmo, avšak obidve pásma môžu byť zosilňované jedným zosilňovačom. Pri zosilňovačoch pre L-pásmo sa používa omnoho dlhšie dopované vlákno, čo dovoľuje použitie nižšej úrovne inverzie a preto sa aj na vyšších vlnových dĺžkach dosahuje veľkého zisku [25].

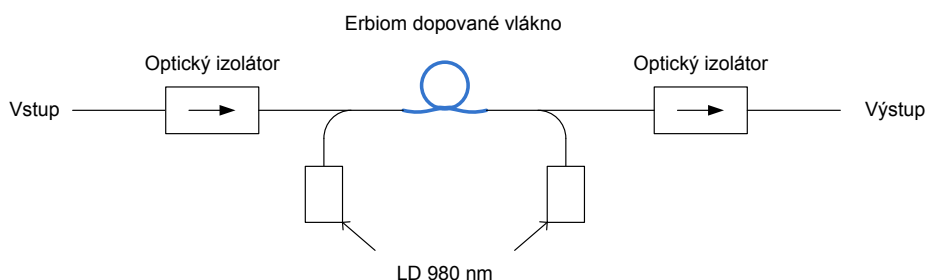
### 4.6.1.1 Čerpanie EDFA

Čerpace zdroje EDFA zosilňovačov, sa dajú rozdeliť podľa toho na akej vlnovej dĺžke čerpací zdroj pracuje. Tieto čerpace zdroje pracujú na vlnových dĺžkach 980 nm a 1460 nm. Svetlo z takéhoto zdroja je obvykle vložené tým istým smerom ako ja signál. Takéto čerpanie sa nazýva súmerné. Je však možné vložiť čerpaciu energiu aj proti smeru toku signálu, nazývané aj protismerné čerpanie. Dá sa využiť buď jeden čerpací zdroj z týchto dvoch variant alebo sa môže použiť duálne čerpanie (súmerné aj protismerné zároveň), s typickým ziskom +17dB a +35dB jednotlivo. Protismerné čerpanie zabezpečuje vyšší zisk, naproti tomu súmerné poskytuje nižší šum. Navyše sa v C-pásme uprednostňuje použitie čerpací zdroj 980 nm, pretože nevytvára také veľké množstvo šumu a dosahuje vyššiu inverziu populácie ako zdroje s vlnovou dĺžkou 1480 nm.

Pri použití čerpaceho zdroja s 980 nm minimalizuje šum v EDFA zosilňovači, čo je výhodné pre použitie v zapojení ako predzosilňovač. Na druhej strane použite protismerného čerpaceho lasera na vlnovej dĺžke 1480 nm zlepši výstupný výkon, ale s vyšším šumom, ktorý je vhodnejší na použitie ako pozosilňovača.

Súčasťou optických zosilňovačov je aj dvojica optických izolátorov, pripojených z oboch strán vlákna. Na vstupe zosilňovača izolátor bráni žiareniu vzniknutému pri spontánnej emisii, aby narušilo predchodziu fázu zosilňovania (Obr 4.7). Na výstupe izolátor zabraňuje

vysielaniu laserových lúčov a možnému poškodeniu, v prípade, že výstupný lúč je odrazený späť do zosilňovača [4].



Obrázok 4.7: Zapojenie zosilňovača s izolátormi

#### 4.6.2 Praseodymom dopovaný optovláknový zosilňovač (PDFA)

Ďalším zosilňovačom s dopovaným vláknom je PDFA. PDFA zosilňovač má vysoký zisk (~30dB) a vysoký saturačný výkon (20dBm). Funguje v rozmedzí vlnových dĺžok 1280 až 1340 nm, čiže tam kde EDFA nie. Avšak PDFA vyžaduje vlákno vyrobené z fluoridu a nie z kremíku, čo nie je veľmi bežné, a vysoko výkonový čerpací laser (viac ako 300mW) pracujúci na vlnovej dĺžke 1017 nm. Fluoridové vlákna sa horšie vyrábajú a majú menšiu odolnosť voči vonkajším vplyvom a tiež niesú kompatibilné so štandardnými telekomunikačnými optickými vláknami [11]. PDFA umožňujú prekonanie vyššieho merného útlmu optického vlákna a taktiež dosahujú nízke hodnoty chromatickej disperzie v prenosoch na veľkú vzdialenosť [25].

#### 4.6.3 Thuliom dopovaný optovláknový zosilňovač (TDFA)

TDFA využíva čerpace lasery pracujúce na vlnových dĺžkach okolo 1047 alebo 1400 nm. Môže byť využívaný na zosílenie v S-pásme (1460-1530 nm) alebo okolo vlnovej dĺžky 1650 nm. Kombinácia prvkov thulia a erbia v zosilňovači poskytuje optické zosílenie vlnových dĺžok vo veľmi veľkom rozsahu [6]. TDFA taktiež využívajú vlákna vyrobené z fluoridu.

### 4.7 Ramanove zosilňovače

Ramanove zosilňovače využívajú stimulovaný Ramanov rozptyl (SRS), ktorý sa vyskytuje v kremíkových vláknach, keď sa cezeň šíri intenzívny čerpací lúč. V určitých prípadoch môže byť použitý aj kryštál. Vstupný signál je zosilňovaný pri priechode v smere alebo proti smeru šírenia lúča z čerpaceho laseru. Pre kremíkové vlákna sa najväčšieho zisku dosahuje pri rozdieli kmitočtov 10-15 THz medzi zosilňovaným a čerpacím signálom [10].

Optické vlákna využívané v Ramanových zosilňovačoch sú obyčajné vlákna a na rozdiel od EDFA nie sú dopované iontami vzácnych zemín. Z tohto dôvodu sa pre zosilňovanie

môžu použiť aj vlastné prenosové vlákna. Existujú taktiež špeciálne vlákna, dopované napr. Germániom, v ktorých sa dosahuje vyšších ziskov. Tieto vlákna sa používajú v situáciách, keď je potrebné dosiahnuť zosilnenie na kratšom vlákne [3].

### 4.7.1 Princíp zosilňovania

V priebehu Ramanovho rozptylu je svetlo dopadajúce na médium prekonvertované na nižšiu frekvenciu. Fotón z čerpaceho zdroja, vybudí molekulu na virtuálnu hladinu. Molekula rýchlo klesne na nižšiu energetickú úroveň a v priebehu tohto procesu sa uvoľní signálny fotón. Rozdiel v energii medzi signálnym fotónom a fotónom z čerpaceho zdroja je rozptýlený vibráciami molekúl hostiteľským materiálom. Tieto úrovne vibrácií určujú frekvenčný posun a tvar krivky Ramanovho zisku. Rozdiel frekvencií (alebo vlnových dĺžok) medzi čerpacím a signálnym fotónom sa nazýva Stokov posun, štandardné prenosové vlákna s Germániovým jadrom majú tento frekvenčný posun až okolo 13,2 THz.

Pri dostatočnom výkone čerpaceho zdroja sa rozptyl rapídne zvyšuje a väčšina čerpanej energie je premenená na rozptýlené svetlo. Tento proces sa nazýva SRS (Stimulated Raman Scattering) a je to spôsob zisku Ramanovho zosilnenia. SRS môže prebiehať na akejkol'vek type vlákna, pretože fotón z čerpaceho zdroja je excitovaný na virtuálnu úroveň. K Ramanovmu zisku dochádza na akejkol'vek vlnovej dĺžke, je to však podmienené výberom vhodnej vlnovej dĺžky čerpaceho zdroja [10].

### 4.7.2 Čerpacie zdroje

Aby mohol Ramanov zosilňovač zosilňovať, sú potrebné pomerne vysoko výkonné zdroje. Pre telekomunikácie a vlnové dĺžky v oblasti 1500-1600 nm je vyžadovaný čerpací zdroj s vlnovou dĺžkou v oblasti 1400 nm. Ako čerpacie zdroje Ramanovho zosilňovača sa používajú polovodičové diódové lasery a RFL (Raman fiber laser).

### 4.7.3 Druhy Ramanových zosilňovačov

Ramanovské zosilňovače môžeme rozdeliť na dva druhy podľa režimu práce. Zosilňovač, ktorý využíva vlákno na prenos a zároveň v tomto vlákne dochádza aj k zosilneniu signálu. Zosilňovač s týmto usporiadaním sa nazýva rozprestrený (Distributed Raman Amplifier). Diskrétny zosilňovač je vtedy, keď je umiestnený ako blok na vysielačnej alebo prijímacej strane (Lumped Raman Amplifier) [10].



#### **4.7.3.1 Rozprestrený Ramanov zosilňovač (DRA)**

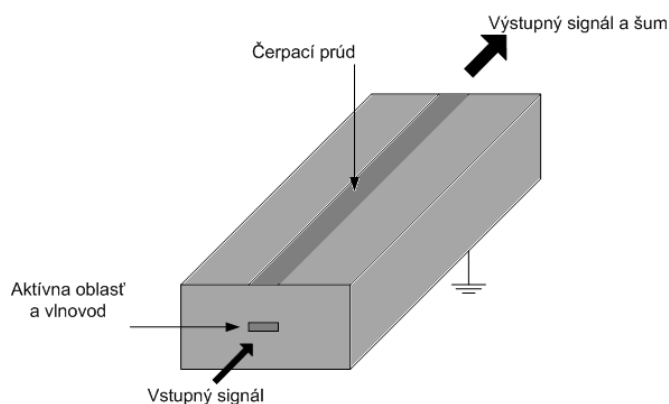
V tomto prípade sa na zosilňovacom efekte podieľa celá prenosová trasa. Zosilňovač je budený z opačnej strany prenosovej cesty. Zaisťuje vyrovnanie výkonových strát signálu v poslednej časti trasy. Nevýhodou takéhoto riešenia je obmedzenie maximálneho počtu prenášaných vlnových dĺžok s ohľadom na odstup kmitočtov čerpacích zdrojov. Tieto zosilňovače majú lepšiu hodnotu šumového čísla čo môže byť využité na predĺženie trasy medzi opakovačmi a predĺženie prenosovej trasy. Zvyčajne sú použité vlákna s dĺžkou presahujúcou 40 km.

#### **4.7.3.2 Diskrétny Ramanov zosilňovač (LRA)**

Tieto zosilňovače sa využívajú k zvýšeniu kapacity optického vlákna, pretože dokážu zosilňovať aj na takých vlnových dĺžkach, ktoré nie sú možné zosilňovať zosilňovačmi s dopovaným vláknom. Napríklad v S-pásme zvýši prenosovú kapacitu až dvojnásobne oproti zosilňovačom EDFA. LRA je riešený ako diskretný blok, umiestnený v jednom mieste prenosovej trasy. Jeho konštrukcia je závislá na požadovanej šírke pásma a profilu zisku daného vedenia [2]. Dĺžka vlákna nachádzajúceho sa v tomto zosilňovači je približne 5 km.

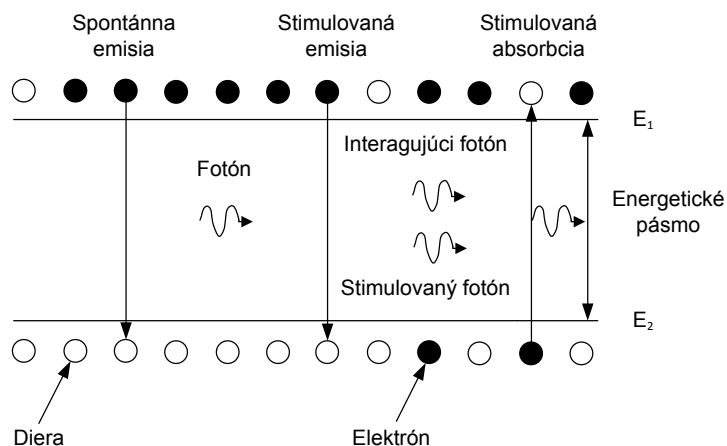
## 5 Polovodičový optický zosilňovač

Hlavná úloha polovodičových zosilňovačov v optických sieťach je priame zosilnenie a tým redukcia strát vo vlákne. Pokroky vo výrobe a návrhu polovodičových zosilňovačov spôsobujú, že nájdu uplatnenie aj v mnohých iných aplikáciach ako sú optické spínanie a konverzia vlnovej dĺžky. V dnešných optických, transparentných sieťach je vyžadované, aby zosilňovanie prebiehalo bez nutnosti konverzie optického signálu na elektrický a späť, a práve SOA je na to vhodné zariadenie. SOA má schopnosti zosilniť a spracovať optický signál pri veľkom rozpätí prenosových rýchlostí a pritom nemá príliš veľké nároky na výkon a má malé rozmery. Principiálny náčrt SOA je zobrazený na Obr. 5.1.



Obrázok 5.1: *Principiálny náčrt SOA*

Princíp zosilnenia v plne optických zosilňovačoch resp. zvýšenie výkonovej úrovne vstupného svetla je umožnený procesom stimulovanej emisie. V SOA musí byť v aktívnej oblasti vytvorený mechanizmus stimulovanej emisie podobne ako je to v laserových diódach, avšak SOA neobsahuje spätnoväzobné [15]. Princíp stimulovanej emisie je znázornený na Obr. 5.2.



Obrázok 5.2: Princíp stimulovanej emisie

Na činnosť SOA zosilňovača je nutné mu dodať energiu z externého čerpaceho zdroja. Rýchlostnou rovnicou vyjadríme účinky napájania, rýchlosť stimulovanej emisie, rýchlosť spontánnej rekombinácie. Z rovnice dostaneme hustotu nosičov  $n(t)$  v excitovanom stave [14]:

$$\frac{\partial n(t)}{\partial t} = R_p(t) - R_{st}(t) - \frac{n(t)}{\tau_r}, \quad (5.1)$$

kde

$$R_p(t) = \frac{J(t)}{qd}, \quad (5.2)$$

je externé napájanie,  $J(t)$  je hustota napájacieho prúdu v aktívnej oblasti,  $d$  je hrúbka aktívnej oblasti,  $\tau_r$  je časová konštanta spontánnej emisie a mechanizmu rekombinácie nosičov a

$$R_{st}(t) = \Gamma a v_g (n - n_{th}) N_{ph} \equiv g v_g N_{ph}, \quad (5.3)$$

je čistá rýchlosť stimulovanej emisie, pričom  $v_g$  je skupinová rýchlosť vstupného svetla,  $\Gamma$  je faktor obmedzenia,  $a$  je koeficient zisku (závislý na optickej frekvencii  $\nu$ ),  $n_{th}$  je prahová hustota nosičov,  $N_{ph}$  je hustota fotónov a  $g$  je celkový zisk na jednotku dĺžky.

Čerpaním dodávame energiu elektrónom v aktívnej oblasti, ktoré prejdú na vyššiu energetickú hladinu. Vstupujúci optický signál zostreľuje tieto excitované elektróny, ktoré procesom stimulovanej emisie prejdú z vyššej energetickej hladiny na nižšiu. V priebehu tohto procesu sa uvoľní energia, ktorá prechádzajúci optický signál zosilní. Okrem optického zosilnenia je na výstupe pridaný šum zosilnený spontánnou emisiou (ASE).

Šumové číslo zosilňovača je dané vzťahom

$$F_n = 2 \cdot \frac{N}{N-N_0} \cdot \frac{g}{g-\alpha_{int}}, \quad (5.4)$$

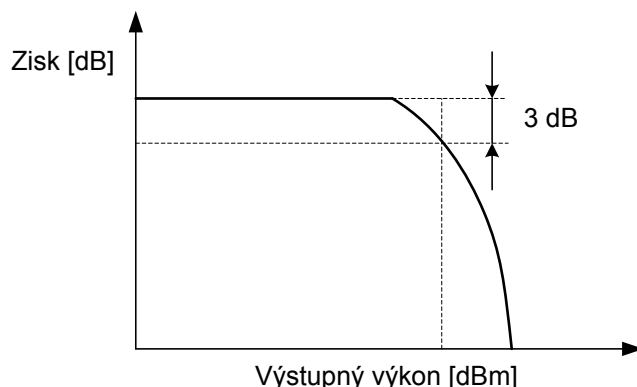
kde  $N$  je hustota nosiča,  $N_0$  transparentná hustota nosiča a  $\alpha_{int}$  koeficient vnútorného útlmu. Zvyškové odrazy môžu zvýšiť šumové číslo zložkou  $1+R_1G$ , kde  $R_1$  je odrazivosť vo vnútri aktívnej časti. Pre väčšinu traveling-wave SOA zosilňovačov je  $R_1G \ll 1$ , a vo väčšine je tento faktor zanedbateľný. Typické  $F_n$  pre polovodičové optické zosilňovače je 5 – 8 [12].

Zisk zosilňovača sa zvyšuje s dĺžkou zosilňovača. Intenzita žiarenia fotónov s energiou  $h\nu$  sa exponenciálne mení so vzdialenosťou v zosilňovacej dutine. Následujúca rovnica vyjadruje zosilnenie po jednom prechode aktívnym médiom

$$G = e^{\Gamma(g_m - \bar{\alpha})L} = e^{g(z)L}, \quad (5.5)$$

kde  $\Gamma$  je optický faktor obmedzenia v dutine,  $g_m$  je koeficient materiáloveho zisku,  $\bar{\alpha}$  je efektívny absorbný koeficient materiálu, ktorým signál prechádza,  $L$  je dĺžka zosilňovača a  $g(z)$  je celkový zisk na jednotku dĺžky [14].

Avšak zisk je obmedzený saturáciou zisku. Je to dôsledkom toho, že hustota nosičov v aktívnej oblasti zosilňovača závisí na vstupnej intenzite. Pri zvyšujúcej sa úrovni vstupného optického signálu, sa z aktívnej oblasti odčerpávajú excitované nosiče. Pri vysokom vstupnom výkone sa už v aktívnej oblasti nenachádza dostatočné množstvo nosičov, tým pádom nie je zabezpečená požadovaná úroveň stimulovanej emisie a z toho vyplýva, že už viac nenastáva zosilnenie odpovedajúce intenzite vstupného signálu [15]. Na Obr. 5.3 [3] je zobrazená závislosť zisku SOA od výstupného výkonu.



Obrázok 5.3: Závislosť zisku SOA do výstupného výkonu

Najdôležitejšiou výhodou SOA je že je vyrobený z InGaAsP (Indium, Gálium, Arzén, Fosfor) a z toho vyplýva že je malý, kompaktný a ľahko integrovateľný s inými polovodičmi a optickými komponentmi. Porovnanie niektorých vlastností EDFA, Ramanových a polovodičových zosilňovačov je v Tab. 4.1 [27].

Tab. 4.1: Porovnanie vlastností zosilňovačov

Vlastnosť	EDFA	Raman	SOA
Zisk [dB]	>40	>25	>30
Vlnová dĺžka [nm]	1530 – 1560	1280 – 1650	1280 – 1650
Šírka pásma (3 dB)	30 – 60	Závisí od zdroja	60
Maximálna saturácia [dB]	22	0,75 x zdroj	18
Polarizačná citlivosť	Nie	Nie	Áno
Šumové číslo [dB]	5	5	8
Výkon čerpaceho zdroja	25 dBm	>30 dBm	<400 mA
Ovládateľnosť	Nie	Nie	Áno
Cena	Stredná	Vysoká	Nízka

#### 4.8 Trawelling- wave zosilňovač (TWA) a Fabry-Perot zosilňovač (FPA)

FPA zosilňovače obsahujú Fabry-Perotovu dutinu, kde sú na oboch stranách umiestnené polopriepustné zrkadlá, ktorých odrazivosť sa pohybuje okolo 32%. Signál vstupujúci do tohto zosilňovača sa zosilňuje pri odrazoch od zrkadiel a emituje s vyššou intenzitou. Výroba FPA je jednoduchá, avšak nevýhodou je citlivosť na zmenu teploty, čo vyžaduje zložité obvody teplotnej stabilizácie a stabilizácie napájacieho prúdu.

TWA zosilňovače môžu obsahovať na koncoch dutiny zrkadlá ktoré, buď odrážajú úplne alebo sú plne priehľadné a k odrazom vôbec nedochádza a tým pádom sa optický signál zosilní len po jednom prechode cez zosilňovač. V sieťových aplikáciách sa využívajú výlučne len TWA zosilňovače, pretože majú väčší saturačný výkon a značne širšiu spektrálnu šírku [14].

## 4.9 Nonlinearity v SOA

SOA sa môžu využívať aj v transparentných optických sieťach na uskutočnenie rôznych užitočných funkcií, pretože z hľadiska nelinearity majú dobré vlastnosti. Nelinearity sú spôsobené najmä zmenou hustoty nosičov nábojov, indukovaných v zosilňovači vstupného signálu. Nelinearity zapríčiňujú problémy akými sú frekvenčné zvlnenie a generácia krížovo modulačných javov. Týchto nelinearít sa dá využiť a zostaviť z nich zariadenie ako napr. konvertor vlnovej dĺžky.

Najčastejšie sa môžeme stretnúť so štyrmi typmi nelinearít:

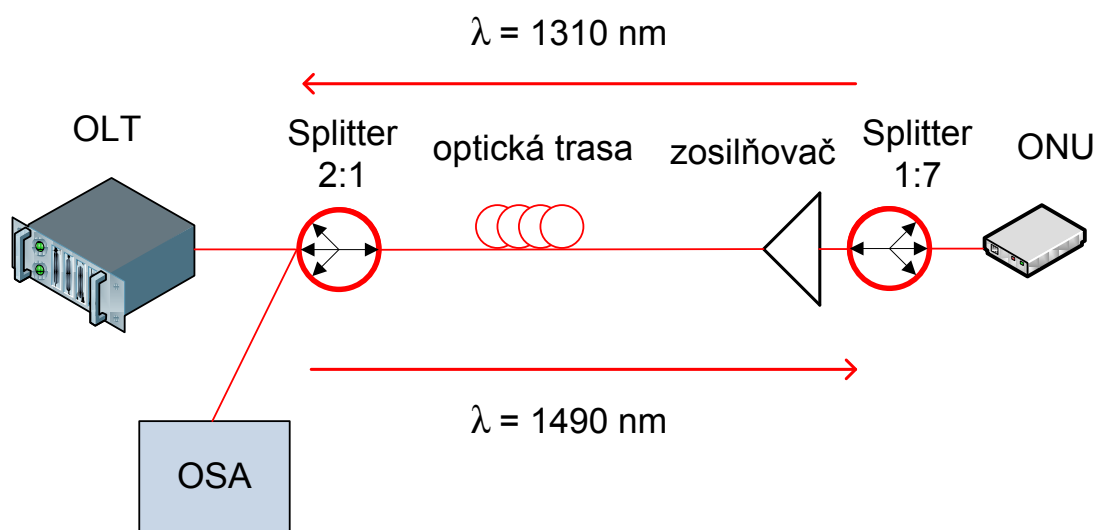
1. Krížová zosilňovacia modulácia XGM – Spektrum zosilnenia materiálom je homogénne široké. Zmena hustoty nosičov náboja v zosilňovači ovplyvňuje všetky vstupné signály. To znamená, že silný signál s jednou vlnovou dĺžkou ovplyvní zisk slabšieho signálu na inej vlnovej dĺžke. Na vstup do SOA sú privedené dva signály: jeden slabý sondovací a jeden silný čerpací signál s malou amplitúdou harmonickej modulácie s uhlovou frekvenciou  $\omega$ . XGM v zosilňovači využíva čerpaciu moduláciu zo snímača. CW signál na požadovanej vlnovej dĺžke je modulovaný zmenou zisku a z tohto dôvodu nesie na výstupe SOA rovnakú informáciu ako vstupný signál. Vtedy zosilňovač pracuje ako konvertor vlnových dĺžok. Hlavná vlastnosť konvertora je účinnosť konverzie. Táto účinnosť je zadefinovaná ako pomer medzi modulačným indexom výstupného signálu k modulačnému indexu vstupného čerpaceho signálu. Účinnosť šírky frekvenčného pásma je od 10 GHz [3].
2. Krížová fázová modulácia XPM – Aktívna oblasť v SOA nemá konštantný index lomu, ale je závislý na hustote nosičov náboja ako aj na materiálovom zisku. Z toho vyplýva, že fáza a zisk vlny šíriacej sa zosilňovačom je závislá na saturácii zisku. Ak bude do zosilňovača privedený viac ako jeden optický signál dojde ku krížovej modulácii fázy medzi týmito signálmi. XPM sa môže využiť na vytvorenie konvertorov vlnovej dĺžky. XPM modulácia spôsobuje zmeny fázy v SOA zosilňovačoch, a preto musia byť umiestňované v interferometrickej konfigurácii, to znamená, že musia konvertovať zmeny fázy na zmeny intenzity za použitia interferenčných miním alebo maxím[21].
3. Štvorvlnné zmiešavanie FWM – Štvorvlnné zmiešavanie je koherentný nelineárny proces, ktorý môže nastať medzi dvoma optickými poliami, silným čerpacím signálom s uhlovou frekvenciou  $\omega_0$  a slabým signálom s uhlovou frekvenciou  $\omega_0 - \Omega$ , pričom oba

signály musia mať rovnakú polarizáciu. Injektované polia spôsobujú zosilnenie v zosilňovači, ktorý je namodulovaný na frekvencii  $\Omega$ . Takto zosilnená modulácia vytvorí nové pole s frekvenciou  $\omega_0 + \Omega$ . FWM v SOA zosilňovači nájde využitie v aplikáciach ako je konvertor vlnových dĺžok, optický demultiplexor a disperzný kompenzátor.

## 6 Simulácia siete EPON v softwarovej aplikácii Optiwave s nasadením SOA

Prvá kapitola praktickej časti bakalárskej práce je venovaná návrhu Ethernetovej pasívnej optickej siete s nasadením polovodičového optického zosilňovača v aplikácii OptiSystem od výrobcu Optiwave. OptiSystem je software pre návrh, otestovanie a optimalizáciu optickej komunikácie. Rozsiahla knižnica ponúka množstvo aktívnych aj pasívnych prvkov, ktorými je možné virtuálne otestovať široké spektrum optických sietí od systémov analogového vysielania až po interkontinentálne chrbtové siete.

Na Obr. 6.1 je základná schéma zapojenia siete, ktorá bola odsimulovaná a zodpovedá aj reálnemu zapojeniu siete v laboratóriu.



Obrázok 6.1: Schéma zapojenia optickej siete

### 6.1 Cieľ návrhu

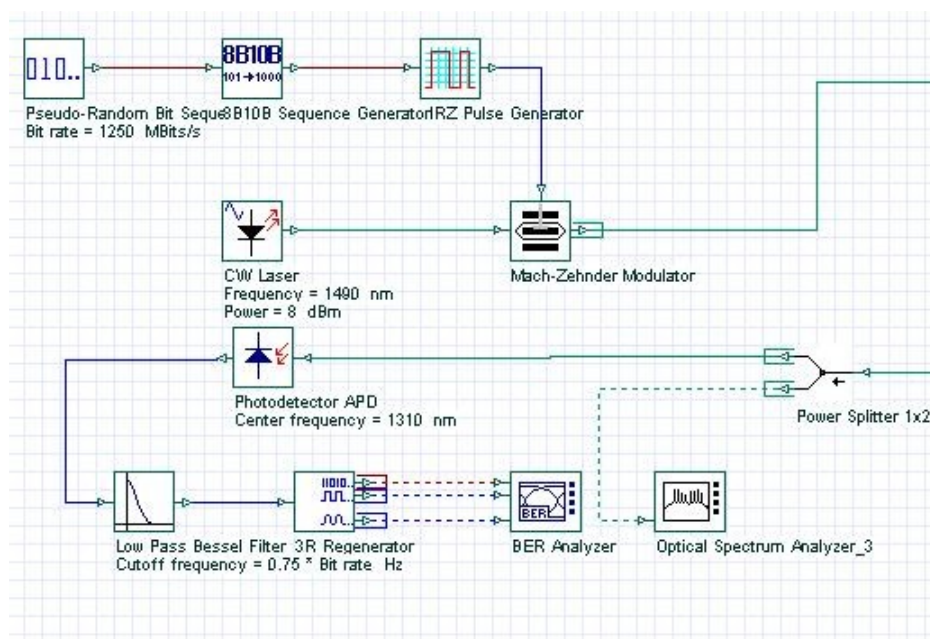
Cieľom návrhu je zložiť Ethernetovú pasívnu optickú sieť a to tak aby sa čo najviac podobala skutočnej topológii zapojenej v školskom laboratóriu a prvky mali parametre identické s tými reálnymi. Do tejto siete je potrebné vložiť polovodičový optický zosilňovač tak aby zosilňoval optický signál na vlnovej dĺžke 1310 nm tzn. vzostupný smer.



## 6.2 Návrh optickej siete

### 6.2.1 OLT

OLT je prvok umiestnený na rozhraní siete poskytovateľ služieb a optickou prístupovou sieťou. V simulácii som zhotovil OLT z dvoch hlavných častí: vysielacej a prijímacej. Zloženie OLT jednotky je vyobrazené na Obr. 6.2.



Obrázok 6.2: Zapojenie OLT v OptiSystem

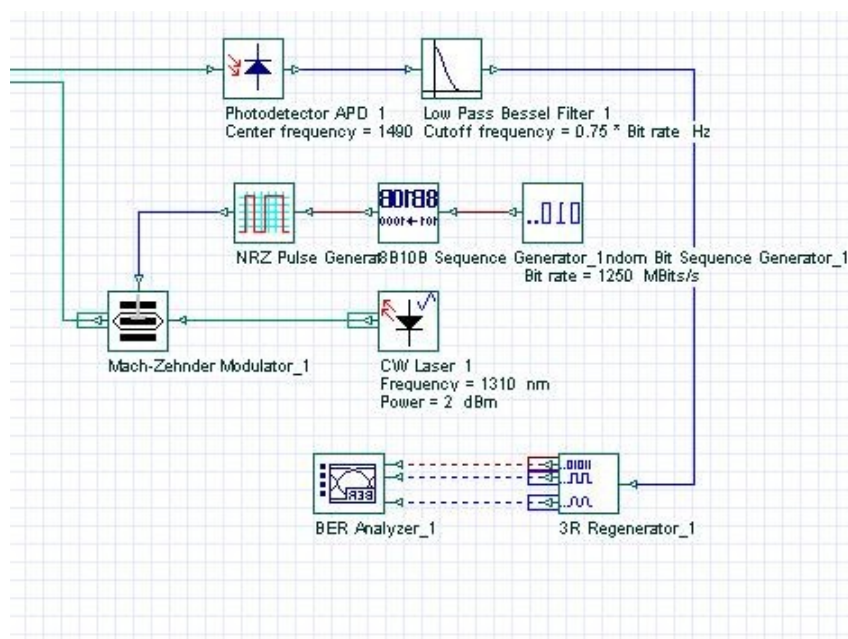
Základným prvkom vysielacej časti je CW laser. EPON v zostupnom smere pracuje na vlnovej dĺžke 1490 nm, preto som nastavil hodnotu lasera na túto hodnotu. Vysielací výkon lasera je nastavený podľa manuálu k OLT jednotke od výrobcu ATi a model iMAP 9102. SFP modul má podľa manuálu vysielací výkon 6,5535 mW, čo je po prevedení 8,1647 dBm. Keďže software neumožňuje desatiné miesta v nastaveniach výkonu, tak som túto hodnotu zaokrúhlil na 8 dBm. Z lasera putuje optický signál do Mach-Zehnder-ovho modulátoru, kde je modulovaný elektrickým signálom z pulzného generátora NRZ (Non-Return-to-Zero). Do toho vstupuje náhodná sekvencia logických „1“ a „0“, ktoré sú blokovo prekladané v kóderi 8B/10B, ktorý EPON siete využívajú. Rýchlosť generovania bitov je nastavená na 1250Mbit/s, čo je prenosová rýchlosť siete EPON.

Prijímaciu časť tvorí APD fotodetektor, ktorý zachytáva vlnovú dĺžku v oblasti 1310 nm, keďže sieť EPON pracuje v vzostupnom smere na tejto vlnovej dĺžke. APD som vybral kvôli vyššej citlivosti. Vo fotodetektore sa signál prekonvertuje z optického na elektrický

a ďalej pokračuje do dolno priepustného Besselovho filtru, ktorý zo signálu odstráni vysokofrekvenčný šum vznikajúci dôsledkom prechodu signálu trasou, vplyvom nelinearít a disperzie. Odtiaľ pokračuje do 3R regenerátora, ktorý obnoví tvar a časovú základňu signálu a zosíli ho. Prvok BER analyzer zobrazí presné vlastnosti signálu po prechode topológiou. Pred prijímaciou stranou je umiestnený pasívny optický rozbočovač, ktorý rozdeľuje optický signál v pomere 1:2 s deliaciom pomerom výkonu 50:50 na oba výstupy. Vložný útlm splittra je 3 dB. V simulácii toto zapojenie splittra nie je nevyhnutné, avšak kvôli čo naj dôveryhodnejšiemu napodobneniu reálneho zapojenie je nutné toto delenie výkonu aby sa predišlo poškodeniu spektrálneho analyzátoru.

### 6.2.2 ONU

ONU jednotka je prvok umiestnený na opačnej strane prístupovej siete, čiže je to rozhranie medzi optickou časťou prístupovej siete a metalickou časťou, ktorá končí u zákazníka. Zloženie tejto jednotky v simulačnom programe je obdobné zloženiu OLT. Má rovnako prijímaciu aj vysielačiu časť avšak s odlišnými parametrami lasera a detektora. Zapojenie ONU jednotky je na Obr. 6.3.



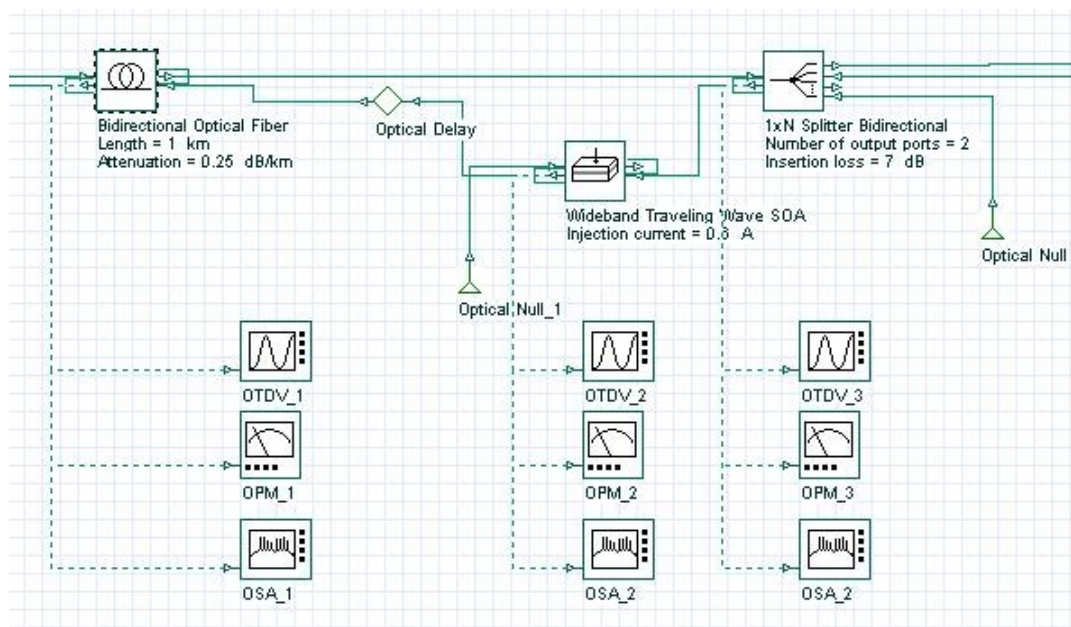
Obrázok 6.3: Zapojenie ONU v OptiSystem

CW laser v ONU jednotke, keďže je to vzostupný smer, vysiela na vlnovej dĺžke 1310 nm. Výkon je oproti OLT značne menší. Stanovil som ho podľa reálnej nameranej hodnoty

v laboratóriu, kde Power Meter nameral hodnotu 1,8 dBm, takže vysielateľ spĺňa podmienky podľa štandardu IEEE802.3ah, podľa ktorého môžu mať ONU jednotky maximálny optický výkon +4 dBm. Hodnotu som zaokrúhlil. Ostatné prvky sú totožné s tými v OLT. Až na detektor, ktorý tentokrát prijíma vlnové dĺžky v oblasti 1490 nm.

### 6.2.3 ODN

V distribučnej sieti sú zahrnuté všetky prenosové prostriedky. V tomto prípade sa konkrétne jedná o optické vlákno, pasívny optický rozbočovač a samotný polovodičový zosilňovač, ktorý medzi sebou prepája OLT a ONU. Zapojenie je zobrazené na Obr. 6.4.



Obrázok 6.4: Zapojenie ODN v OptiSystem

Optická distribučná sieť obsahuje obojsmerné optické vlákno G.652D aby mohlo prenášať optický signál ako jedným tak aj druhým smerom a s útlmom 0,25 dB/km. Prvok Optical Delay slúži pre potreby simulácie a je nevyhnutný pre obojsmerný prenos. Je vložený pred optické vlákno a nastavený na hodnotu 1. Následne je nutné zvýšiť počet opakovaní simulácie. To sa nastavilo v Layout Parameters/Signals a položka Iterations X. Za X sa vloží číslo, ktoré zodpovedá počtu Optical Delay na trase +1. Optické oneskorenie je v simulácii veľmi dôležité, lebo bez neho by sa v obojsmerných prvkoch vypočítal len jeden smer. Na to naväzuje aj zobrazovanie na meracích prístrojoch, kde musíme nastaviť index signálu. Pri prvku pred optickým oneskorením bude index 0. Pri prvku po optickom oneskorení bude index rovný počtu opakovaní simulácie -1. Nevyhnutným prvkom pasívnych optických sietí je splitter. V mojom prípade som použil delič 1:2 aj keď v laboratóriu sa používal s pomerom 1:7, no

testovanie prebiehalo len na jednej ONU jednotke. Vložný útlm som však nastavil podľa splitteru 1.7 a to 7 dB. Prvky Optical Null sú privedené na každý nevyužitý vstup a generujú optický signál s nulovou hodnotou. Prvky Optical Null slúžia len ako náhrada, keďže na vstupy by mali byť privedené jednotlivé ONU jednotky, pre simulačné účely však stačí jedna ONU jednotka.

Wideband Travelling Wave SOA - Širokopásmový polovodičový optický zosilňovač s postupujúcou vlnou je osadený v vzostupnom smere. Keďže polovodičové zosilňovače najlepšie zosilňujú v oblasti O-pásma, kde sa práve nachádza vlnová dĺžka 1310 nm, bude zosilňovať len vzostupný smer. SOA model je založený na numerickom riešení sady viazaných diferenciálnych rovníc, ktoré popisujú vzájomné pôsobenie medzi hustotou nosičov a fotónmi.

Signálne polia sú vyjadrené rovnicami

$$\frac{dE_{sk}^+(z)}{dz} = \left( -j \cdot \beta_k + \frac{1}{2} (\Gamma \cdot (v_k, n) - \alpha(n)) \right) \cdot E_{sk}^+(z) \quad (6.1)$$

$$\frac{dE_{sk}^-(z)}{dz} = \left( -j \cdot \beta_k + \frac{1}{2} (\Gamma \cdot (v_k, n) - \alpha(n)) \right) \cdot E_{sk}^-(z) \quad (6.2)$$

kde:

$E_{sk}^+$	je komplexná postupujúca vlna, šíriaca sa v kladnom z smere,
$E_{sk}^-$	je komplexná postupujúca vlna, šíriaca sa v zápornom z smere,
$z$	sa rozprestiera pozdĺž osi zosilňovača so začiatkom na vstupnej čelnej strane,
$\beta_k$	je koeficient šírenia,
$\alpha$	je koeficient materiálových strát,
$g_m(v_k, n)$	je koeficient materiálového zisku,
$\Gamma$	je optický hraničný faktor.

Zosilnenie signálu taktiež závisí na množstve šumu vyprodukovaného spontánnou emisiou v zosilňovači. Výpočet pre spontánnu emisiu zosilňovača s postupujúcou vlnou je daný vťahmi

$$\frac{dN_j^+(z)}{dz} = \left( \Gamma \cdot g_m(v_j, n) - \alpha(n) \right) \cdot N_j^+(z) + R_{sp}(v_j, n) \quad (6.3)$$

$$\frac{dN_j^-(z)}{dz} = - \left( \Gamma \cdot g_m(v_j, n) - \alpha(n) \right) \cdot N_j^-(z) + R_{sp}(v_j, n) \quad (6.4)$$

kde:

$N_j^+$	je rýchlosť fotónu pri spontánnej emisii postupujúcej v kladnom z smere,
$N_j^-$	je rýchlosť fotónu pri spontánnej emisii postupujúcej v zápornom z smere,
$R_{sp}$	je šum emisie spojený v $N_j^+$ a $N_j^-$ .

Materiálový zisk sa vypočíta vzťahom

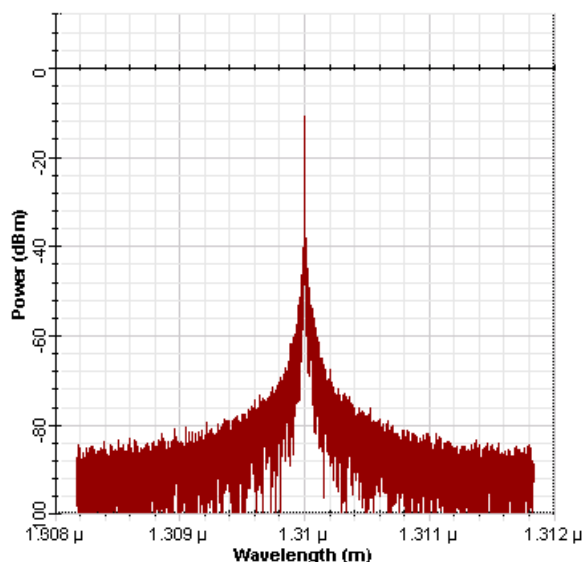
$$g_m(v, n) = \frac{c^2}{4\sqrt{2}\pi^{3/2}n_1^2\tau v^2} \cdot \left( \frac{2m_e m_{hh}}{h} \cdot \frac{1}{(2\pi)} (m_e m_{hh}) \right) \quad (6.5)$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla,  $h$  je Planková konštanta a  $\tau$  je životnosť rekombinácie žiarenia.

Pre názornejšie porovnanie výsledkov som do trasy umiestnil aj viaceré meracie prístroje. OTDV (Optical Time Domain Visualizer) je merací prístroj, ktorý zobrazuje optický signál v časovej oblasti. Taktiež môže zobrazovať intenzitu, frekvenciu a fázu signálu. OSA (Optical Spectrum Analyzer) zobrazuje optické signály vo frekvenčnej oblasti. Zároveň môže zobrazit intenzitu signálu, výkonové spektrum, fázu a disperziu pre X a Y polarizáciu. OPM (Optical Power Meter) počíta a zobrazuje priemerný výkon optického signálu.

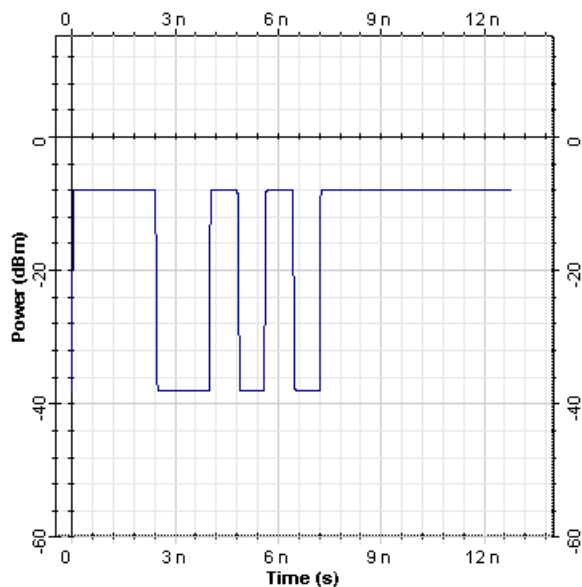
### 6.3 Zosilnenie optického signálu

Zosilnenie prebiehalo v optickom zosilňovači, v ktorom bol nastavený napájací prúd 600 mA. Toto je hodnota prúdu, pre zosilnenie vlnovej dĺžky 1310 nm pre zosilňovač BOA1017S, ktorý mal byť aj reálne zapojený. Do polovodičového optického zosilňovača vstupuje optický signál z ONU, ktorá má optický výkon 2 dBm. Kým tam však dorazí, prejde už cez splitter, kde jeho výkonová úroveň klesne. Určité straty nastávajú už v Mach-Zhender modulácii. Celkový výkon pred vstupom do zosilňovača mal hodnotu -9,276 dBm. Spektrum tohto signálu zo spektrálneho analyzátoru OSA\_3 je zobrazené na Obr. 6.5.



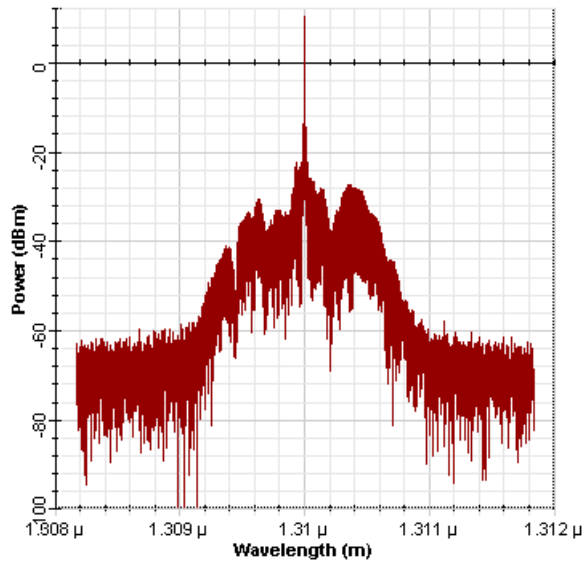
Obrázok 6.5: Spektrum signálu 1310 nm

Na Obr. 6.6 môžeme vidieť priebeh impulzov vstupujúcich do zosilňovača získané z OTDV\_3.

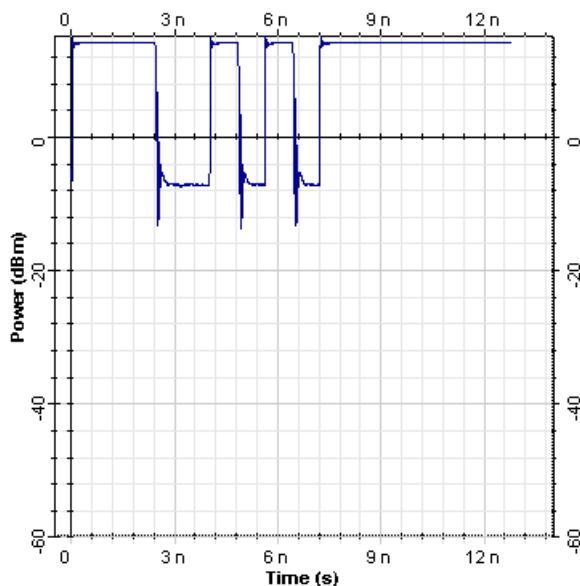


Obrázok 6.6: Časový priebeh optických impulzov

Na Obr. 6.7 je zobrazené spektrum už zosilneného signálu s výkonom +13,485 dBm zobrazeného z analyzátoru OSA\_2. Z obrázku je vidieť, že zosilňovač zosilňuje širšie spektrum signálov a nie len konkrétnu vlnovú dĺžku.



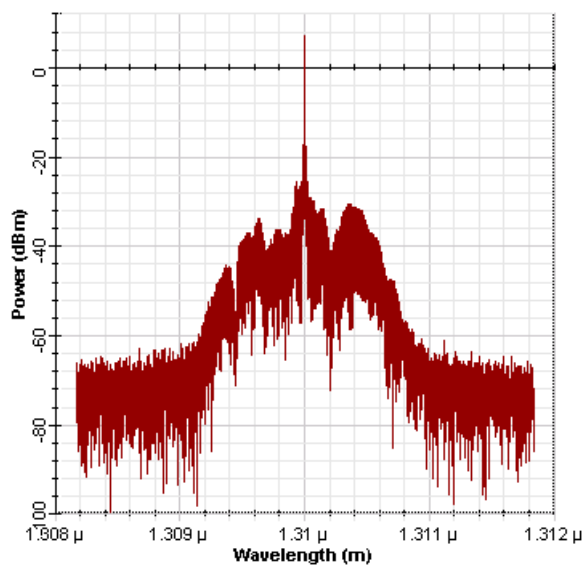
Obrázok 6.7: Spektrum zosilneného signálu



Obrázok 6.8: Časový priebeh zesilnených optických impulzov

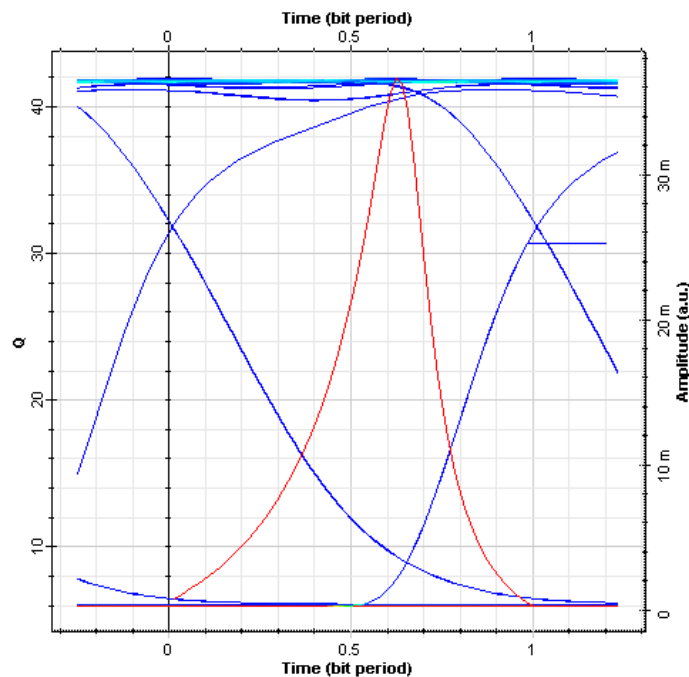
Na Obr. 6.8 je zobrazený časový priebeh impulzov, ktoré sú po zesilnení. Vidíme, že signál je skutočne zesilnený avšak nastala aj deformácia pulzov, čo môže byť spôsobené pridaným šumom vytvoreným spontánnou emisiou ASE.

Obr. 6.9 zobrazuje spektrum signálu po prechode optickým vláknom s dĺžkou 1 km a prechode splittrom s vložitým útlm 3 dB. Celkový útlm trasy bol zatiaľ 3,25 dB a je vidieť, že výkonová úroveň klesla. Celkový výkon má hodnotu 10,219 dBm.



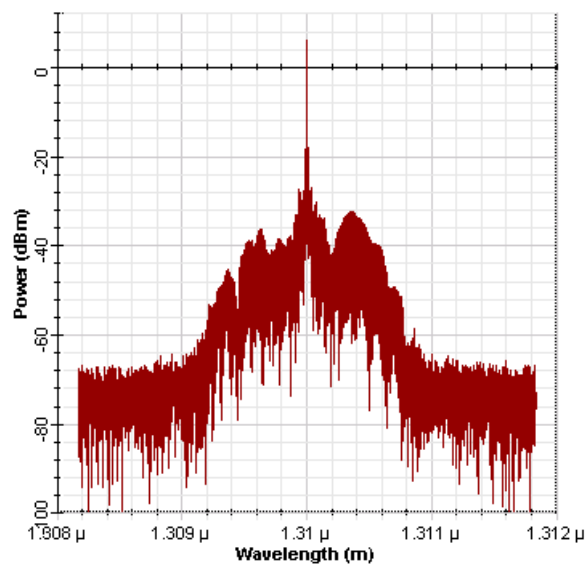
Obrázok 6.9: Spektrum po prekonaní optickej trasy 1 km

V ďalších krokoch som postupne zvyšoval dĺžku optickej trasy a sledoval aký je možný dosah trasy s použitím zosilňovača. Bral som do úvahy, že maximálna chybovosť nesmie presiahnuť hodnotu  $10^{-9}$  [24] a to som si overil v BER analyzéri. Pri 1 km, bola hodnota BER=0. Diagram oka aj s hodnotu Q-factoru je na Obr. 6.10.



Obrázok 6.10: Diagram oka pri 1 km

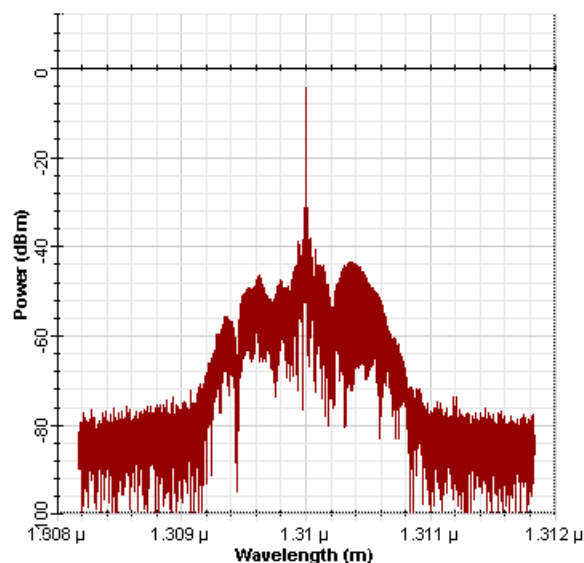
Spektrum signálu s dĺžkou optickej trasy 10 km je na Obr. 6.11. Útlm trasy je tentokrát 5,5 dB a celkový výkon 7,977 dBm.



Obrázok 6.11: Spektrum signálu po 10 km

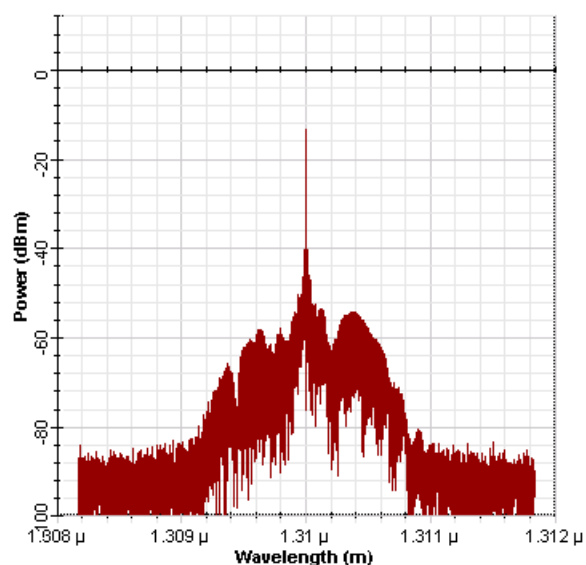


Pri dĺžke trasy 50 km už bol útlm trasy značný a činilo to hodnotu 15,5 dB. Signál bol však stále dostatočne silný, hodnota celkového výkonu bola -2,023 dBm. Spektrum signálu po 50 km je na Obr. 6.12.



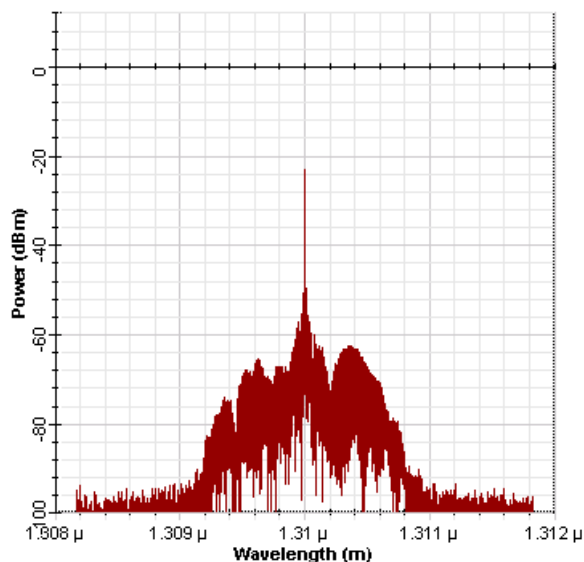
Obrázok 6.12: *Spektrum signálu po prekonaní 50 km*

Milníkom bola vzdialenosť 84 km, kde v zostupnom smere hodnota BER už bola vyššia ako  $10^{-9}$  tzn. že dosah OLT jednotky už bol na konci, avšak dosah ONU jednotky bol ešte stále v norme vďaka použitému zosilňovaču. Útlm trasy od OLT ku ONU jednotke je v tom prípade 28 dB a útlm trasy od výstupu zosilňovača do APD detektora OLT je 24 dB. Spektrum zosilneného signálu po 84 km s celkovým výkonom – 10,531 dBm je zobrazené na Obr. 6.13.



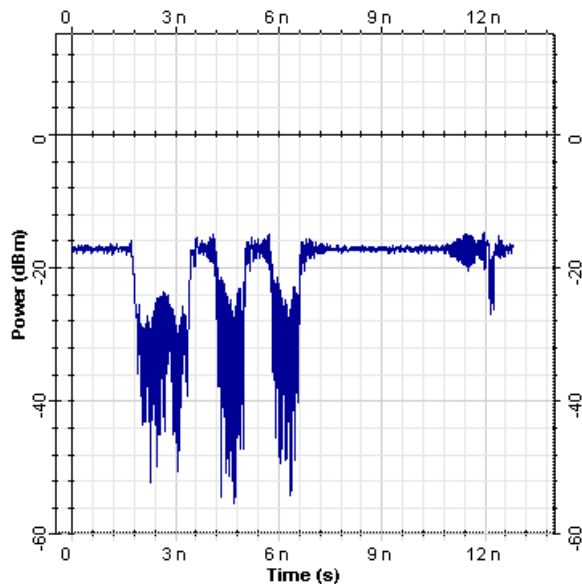
Obrázok 6.13: *Spektrum signálu po 84 km*

ONU jednotka dosiahla hodnotu BER vyššiu ako  $10^{-9}$  až po prekonaní trasy o dĺžke 125 km (útlm 34,25 dB). Výkonová úroveň pred detektorom dosahovala úroveň -20,772 dBm čo by detektor ešte zvládol prijať avšak deformácia pulzov už bola značná. Na Obr. 6.14 je zobrazené spektrum signálu po 125 km.



Obrázok 6.14: *Spektrum signálu po 125 km*

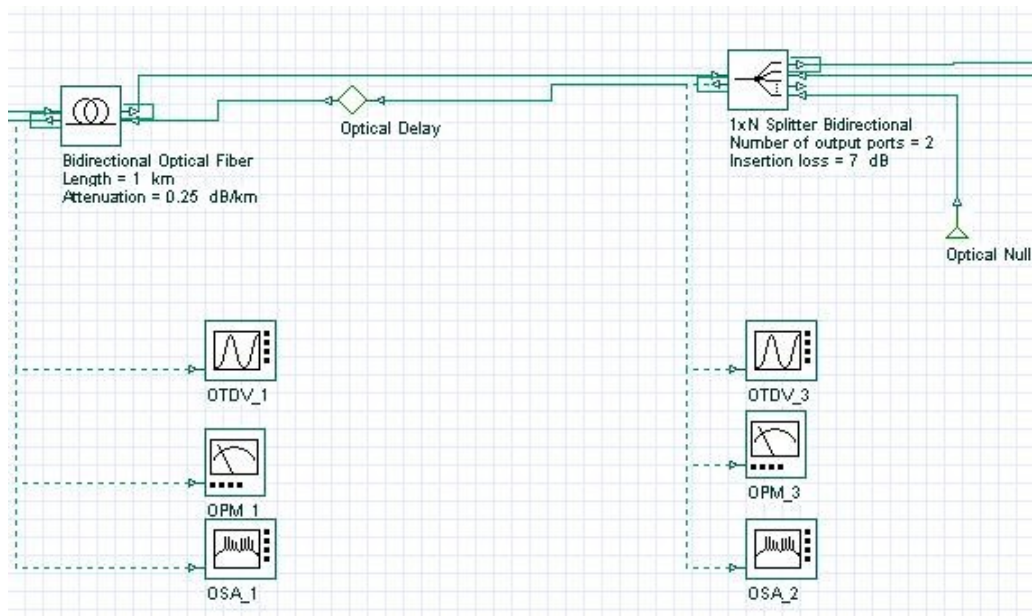
Na Obr. 6.15 je vyobrazenie deformovaných impulzov po prekonaní trasy 125 km z prístroja OTDV\_1.



Obrázok 6.15: *Deformácia impulzov po prechode trasou 125 km*

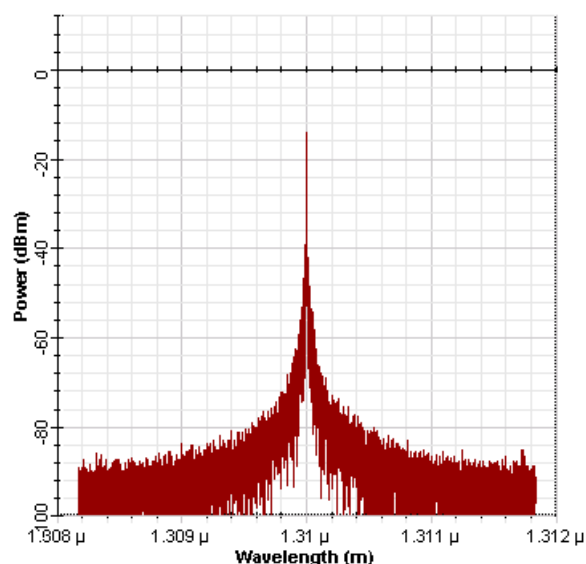
## 6.4 Sieť EPON bez zosilňovača

Na Obr. 6.16 je zapojenie ODN bez SOA. Ostatné komponenty zostali bez zmien.



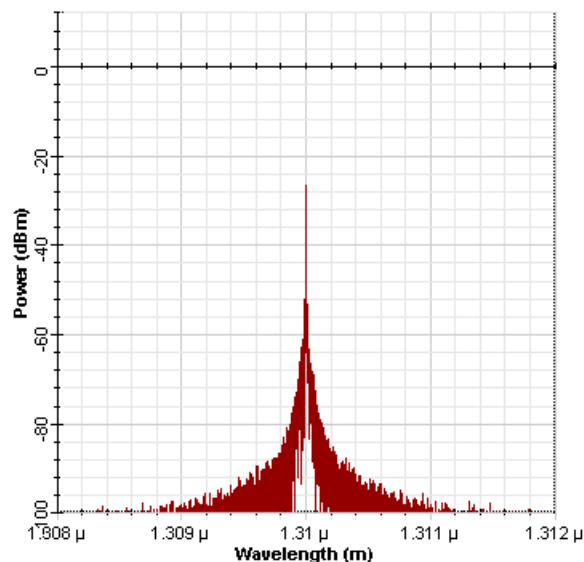
Obrázok 6.16: ODN bez zosilňovača

V zapojení bez zosilňovača som taksito sledoval maximálny dosah ONU jednotky. Keďže signál nebol nijako zosilnený, teoretický dosah by mal byť mnohonásobne kratší. Podľa 1000BASE-PX20-D/U by mal byť dosah len 20 km. Spektrum signálu po trase 1 km je na Obr. 6.17 Výkonová úroveň signálu je pred detektorom na strane OLT -12,536 dBm. BER analyzér zobrazoval hodnotu 0, v praxi je táto hodnota nereálna.



Obrázok 6.17: Spektrum signálu po 1 km bez SOA

Po trase 10 km bola stále hodnota BER 0. Výkonová úroveň samozrejme klesla, ale keďže impulzy neboli zaťažené šumom zosilňovača, detektor nemal problém s ich rozlišovaním. Hodnota BER sa zvýšila až po 13 km, kde dosahovala hodnotu  $10^{-220}$ . Kritickú hodnotu BER nadobudla EPON sieť až pri 49 km, výkonová úroveň signálu bola  $-24,536$  dBm, takže dosah ONU jednotky podľa simulácie je 49 km. Na Obr. 6.18 je spektrum signálu po 49 km.



Obrázok 6.18: *Spektrum signálu po 49 km*

## 6.5 Vyhodnotenie simulovaný dat

Simulácia preukázala zvýšenie maximálneho dosahu siete použitím polovodičového optického zosilňovača. Zosilňovač v simulácii pri napájacom prúde 600 mA dokázal zvýšiť výkonovú úroveň optického signálu z  $-9,276$  dBm na  $+13,485$  dBm a zvýšiť aj dosah ONU jednotky z 49 km na 125 km t.j. navýšenie o 76 km. Ničmenej, stále je to len simulácia, ktorá počíta v matematickej rovine a tieto výsledky sa môžu od skutočných rázne líšiť.

## 7 Zapojenie optického zosilňovača do EPON siete

Druhá kapitola praktickej časti je venovaná meraniu spektra signálu v sieti EPON s nasadením polovodičového signálu. Táto časť pozostávala z viacerých blokov:

- Základná konfigurácia OLT a registrácia ONU jednotky
- Zapojenie zosilňovača do idilového puzdra
- Zapojenie zosilňovača do siete
- Meranie parametrov siete spektrálnym analyzér

Schéma zapojenie siete je zobrazená na Obr. 6.1.

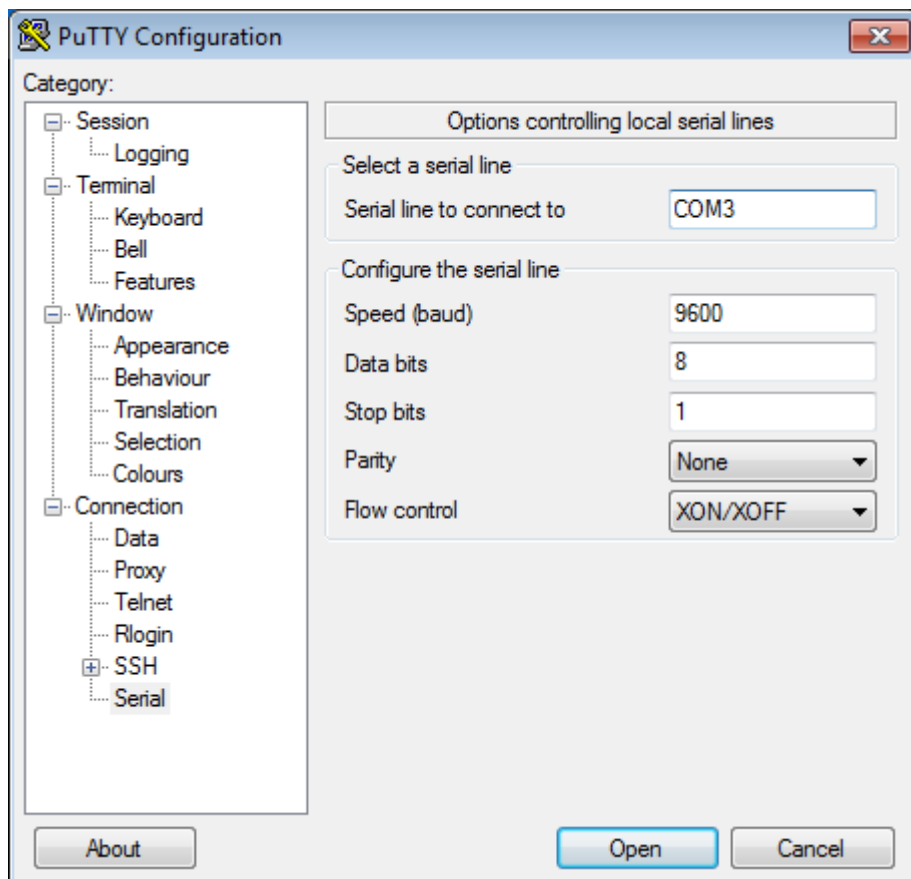
Nanešťastie zapojenie zosilňovača do siete nemohlo byť prevedené, z toho vyplýva že meranie parametrov siete prebehlo len na sieti EPON bez zosilňovača.

### 7.1 Základná konfigurácia OLT a registrácia ONU jednotky

Laboratórium bolo vybavené OLT jednotkou od amerického výrobcu Allied Telesis s modelovým označením iMAP 9102. Toto zariadenie je možné osadiť ľubovoľnými zásuvnými kartami. Pri mojom zapojení som využil len kartu GEPON/EPON2 s CFC12 a tie obsahovali tieto rozhrania:

- CFC12 – obsahuje rozhrania pre administráciu zariadenia MGMT a CONSOLE, ktoré sú typu RJ-45. Na tejto karte sú navyše 2 porty typu RJ-45 a 4 šachty pre SFP moduly slúžiace ako WAN rozhranie,
- GEPON/EPON2 – Slúži na prevádzku pasívnej optickej siete a obsahuje 2 šachty pre SFP moduly.

Pre pripojenie k OLT a jeho konfigurácii sa pripájalo cez port CONSOLE. Kábel, ktorý bol vyvedený k notebooku na ktorom prebiehala konfigurácia mal na jednej strane koncovku RJ-45 a na druhej strane sériové rozhranie RS-232, ktoré na pripojení k notebooku potrebovalo redukciu na USB. Na prístup k príkazovému riadku zariadenia som použil emulátor terminálu PuTTY. Konfigurácia PuTTY na spojenie s CLI zariadenia je zobrazená na Obr. 7.1.



Obrázok 7.1: *Nastavenie PuTTY*

Po spojení je nutné zadať prihlasovacie údaje, kde prihlasovacie meno bolo „officer“ a heslo taktiež „officer“. Na Obr. 7.2 je zobrazený prihlasovací dialóg.



Obrázok 7.2: *Prihlasovací dialóg*

Príkazom `show card` (Obr. 7.3) zobrazíme informácie o aktuálne zapojených kartách, číslo slotu, typ a stav poprípadne chyby karty.

```
officer SEC>> sh card

--- Card Information ---

  Slot   Prov
  Card Type State Faults
-----
  0      ADSL24B   UP-UP-Online   -
  1      FX20     UP-UP-Online   -
  2      EPON2    UP-UP-Online   -
  3      CFC12    UP-UP-Online (Active) -
  4      GE2RJ    UP-UP-Online   -
  5      GE4      UP-UP-Online   -
  FAN    PEM71    UP-UP-Online   -
```

Obrázok 7.3: Výpis príkazu *show card*

Z výpisu vidíme, že karta, ktorú potrebujeme (EPON2) je zapnutá. Príkazom `show card 2` (Obr. 7.4) vypíšeme bližšie údaje o karte ako modelové číslo, sériové číslo, verziu firmware a pod.

```
officer SEC>> sh card 2

--- Card Information ---

Slot..... 2
Type..... EPON2
State..... UP-UP-Online
Provisioning Profile..... AutoProv (*)

Hardware
  Model Number (Revision)..... TN-118-B (Rev G)
  Serial Number..... A039794093200007 G
  CLEI Code..... NOCLEICODE

Software
  Running Load..... 12.0.2
  Preferred Load..... epon2_12.0.2.tar
  Temporary Load..... <none>
```

Obrázok 7.4: Výpis príkazu *show card 2*

V laboratóri sa využívali ONU jednotky s modelovým označením AT-ON1000, ktorých výrobcom bola taktiež spoločnosť Allied Telesis. Boli vybavené jedným optickým portom pre konektory SC a jedným portom RJ-45, s podporou rýchlostí 10/100/1000 Mbit/s. Mali štvoricu LED indikátorov, pričom na ľavej strane bol indikovaný stav jednotky a pripojenie do PON, na pravej strane bola indikovaná rýchlosť pripojenia.

Príkazom `create onu` sa jednotky pridiávali do OLT. Vytváranie pozostávalo s pomenovania jednotky, nastavenia ID, zadanie MAC adresy a nastavenie typu jednotky, čo pre tento prípad bolo TK3713. Je samozrejmé, že predtým bolo nutné vedieť MAC adresu jednotky, ktorá bola napísaná na spodnej strane. Príkaz na pridanie jednotky do OLT môže vyzeráť nasledovne:

```
Create onu <meno> onuid <1-15> macaddress <MAC adresa> type  
tk3713
```

Následným príkazom `show onu` (Obr. 7.5) sme si mohli zobrazit' jednotky, ktoré sú zaregistrované, ich mac adresy, ID a ich aktuálny stav.

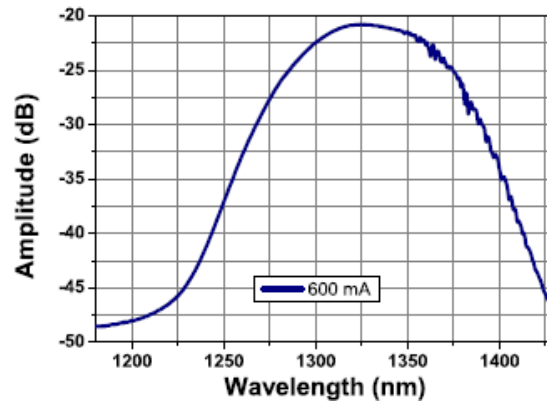
```
officer SEC>> sh onu  
  
--- ONU Interfaces ---  
  
Interface      State EPON  ID MAC Address  
-----  
ONU1           UP-DN  2.0  1  00:15:77:43:98:68  
ONU2           UP-DN  2.0  2  00:15:77:43:A5:60  
ONU3           UP-UP  2.0  3  00:15:77:43:A5:50  
ONU4           UP-DN  2.0  4  00:15:77:43:A5:58  
ONU5           UP-DN  2.0  5  00:A5:77:43:98:58
```

Obrázok 7.5: Výpis príkazu `show onu`

## 7.2 Zapojenie polovodičového zosilňovača

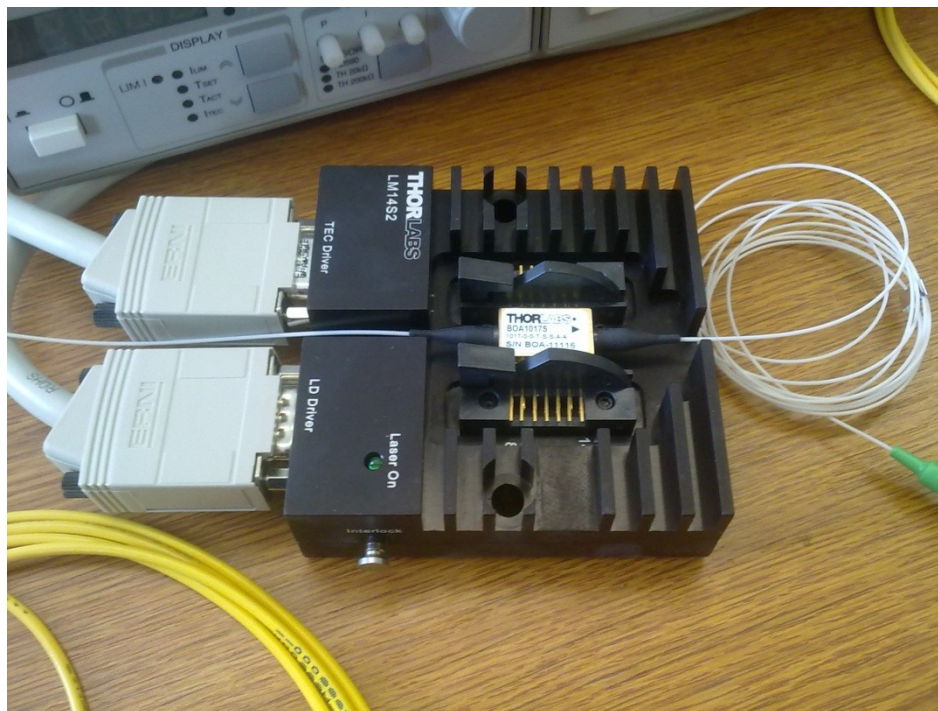
K dispozícii bol polovodičový optický zosilňovač od firmy Thorlabs s modelovým označením BOA1017S pre zosilňovanie vlnových dĺžok v pásme O, konkrétne pre vlnovú dĺžku 1310 nm. Typický čerpací prúd pre tento zosilňovač je 600mA a šírka pásma predstavuje hodnotu 70 nm. B na začiatku označenia modelu značí, že je to Booster zosilňovač a jeho umiestnenie by malo byť na začiatku trasy hneď za laserom aby vybudilo vlákno na maximálnu možnú úroveň. Na Obr. 7.6 je zobrazené spektrum signálu podľa datasheetu výrobcu, z ktorého je vidieť pri ktorých vlnových dĺžkach je najvyššia amplitúda signálu resp. najvyššie zosilnenie.





Obrázok 7.6: *Spektrum zosilnených vlnových dĺžok*

Zosilňovač sa zapájal do 14-pinového puzdra taktiež od výrobcu Thorlabs s modelovým označením LM14S2. Do puzdra sa vkladala karta, na ktorú boli vyvedené PIN-y zosilňovača. Puzdro sa pomocou dvoch RS-232 sériových portov pripájal na termoelektrický zdroj kvôli tepelnej stabilizácii a na prúdový zdroj na ladenie operačného prúdu zosilňovača. Zapojenie optického zosilňovača v puzdre je na Obr. 7.7.



Obrázok 7.7: *Polovodičový zosilňovač zapojený v puzdre*

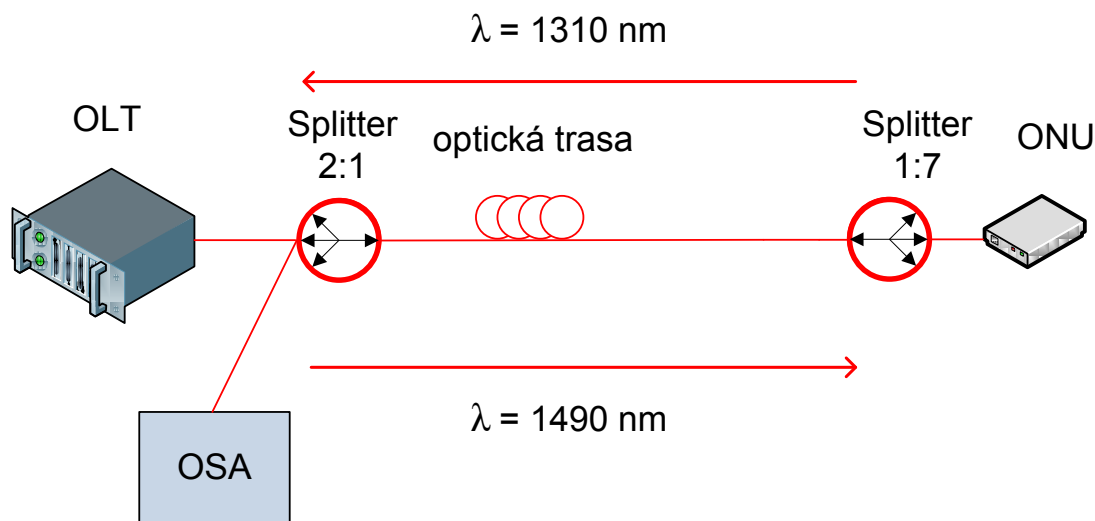
Po pripojení zosilňovača do siete EPON sa však nepodarilo inicializovať ONU jednotku, preto sme hľadali chybu. Prvá alternatíva bola, že prúdový zdroj s maximálny prúdom 500 mA nie je dostatočný na vybudenie zosilňovača, no aj po pripojení prúdového zdroja a nastavení hodnoty operačného prúdu na 600 mA nenastala zmena. Na výstup zosilňovača sme pripojili Power Meter, ktorý nenameral nič viac ako šum. Po odpojení zosilňovača s puzdra vyšlo najavo, že vlákno na výstupe zrejme nebolo dostatočne upevnené a vytiahlo sa. Z tohto dôvodu nebolo možné uskutočniť meranie siete EPON so zapojeným zosilňovačom. Na Obr. 7.8 je fotografia zosilňovača s odpojeným vláknom.



Obrázok 7.8: Zosilňovač s odpojeným vláknom

### 7.3 Meranie maximálneho dosahu siete EPON

Keďže zosilňovač nebol k dispozícii, odmeral som maximálny dosah siete EPON bez. Schéma zapojenia sa teda pozmenila (Obr. 7.9).



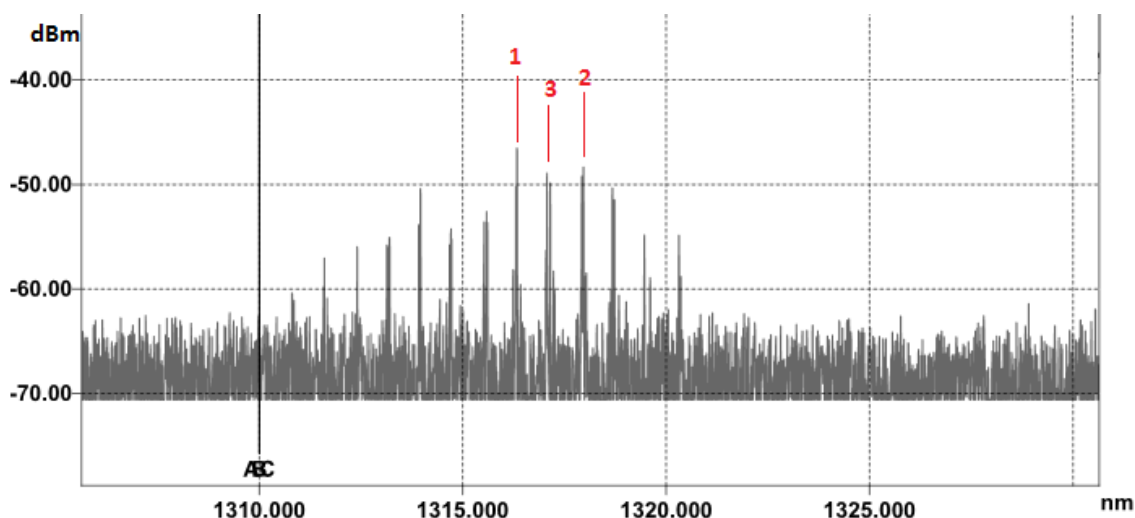
Obrázok 7.9: Schéma zapojenia siete bez zosilňovača

V sieti som nahradil optickú trasu digitálnym útlmovým článkom EXFO FVA-60B s vložným útlmom 2,5 dB. Ten umožňoval zvyšovať alebo znižovať hodnotu útlmu v krokoch 0,05 dB; 0,2dB; a 1 dB. Splitter 2:1 rozdeľoval výkonovú úroveň v pomere 90:10 tzn. 10% prijatého optického výkonu smerom z ONU jednotky bolo privedených na vstup spektrálneho analyzátoru (OSA) a 90% výkonu na vstup OLT. V zapojení bol použitý spektrálny analyzátor EXFO FTB-500 s modulom FTB-5240B.

#### 7.3.1 Spektrálna analýza optického signálu

Spektrálny analyzátor je zariadenie, ktoré zobrazuje amplitúdu signálu resp. výkonovú úroveň voči frekvencii, v prípade, že sa jedná o meranie optickej trasy tak voči vlnovej dĺžke. Keďže meranie prebiehalo v vzostupnom smere, kde EPON pracuje na vlnovej dĺžke 1310 nm bolo nutné na analyzátori nastaviť zobrazovanie vlnových dĺžok v tejto oblasti. Dolnú medzu, kde bol analyzátor schopný detekovať signály som nastavil nanajnižšiu hodnotu a to -67dBm.

Spektrum signálu bez zapojeného útlmového článku je na Obr. 7.10.



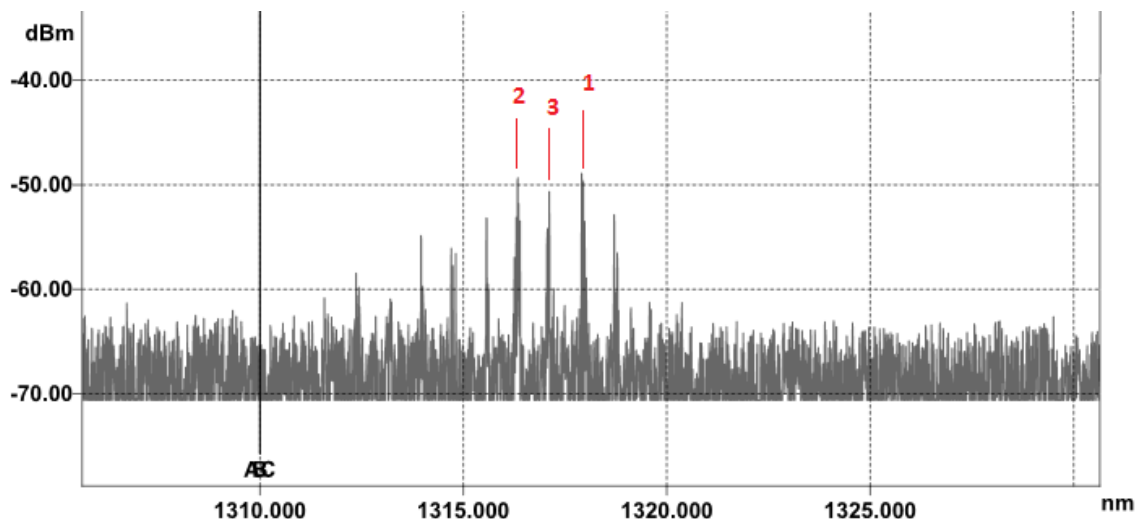
Obrázok 7.10: Spektrum signálu bez zapojeného útlmového článku

Tab. 7.1: Hodnoty 3 špičiek s najvyššiou výkonovou úrovňou; bez útlmu

Špička	Vlnová dĺžka [nm]	Výkon auto. [dBm]	SNR priemer. [dB]	Šum priemer. [dBm]	Výkon špičky [dBm]	Výkon kanálu [dBm]
1	1316,337	-46,47	20,31	-66,78	-46,47	-66,10
2	1317,474	-48,96	18,29	-67,25	-48,96	-66,10
3	1316,878	-49,73	19,22	-68,42	-49,73	-66,10

Pri zhotovení tejto snímky bola do siete pripojená len jedna ONU jednotka. Napriek tomu je vidieť, že analyzátor zobrazil signály nielen pri jednej vlnovej dĺžke. To je spôsobené použitím Fabry-Perotovho laseru, ktorý sa v ONU jednotkách využíva [8]. Posun vlnovej dĺžky je zas spôsobený teplotnými podmienkami v laboratóriu, čo však nemá vplyv na komunikáciu, pretože detektor v OLT je schopný prijať širšie spektrum vlnových dĺžok. Najvyššiu výkonovú úroveň mala špička na vlnovej dĺžke 1316,337 nm s hodnotou – 46,47 dBm (Tab. 7.11).

Na Obr. 7.11 je spektrum signálu, pri zapojení útlmového článku a útlme 4 dB. Tentokrát bola najvyššia úroveň výkonu -49,02 dBm pri vlnovej dĺžke 1317,471 nm (Tab. 7.2).

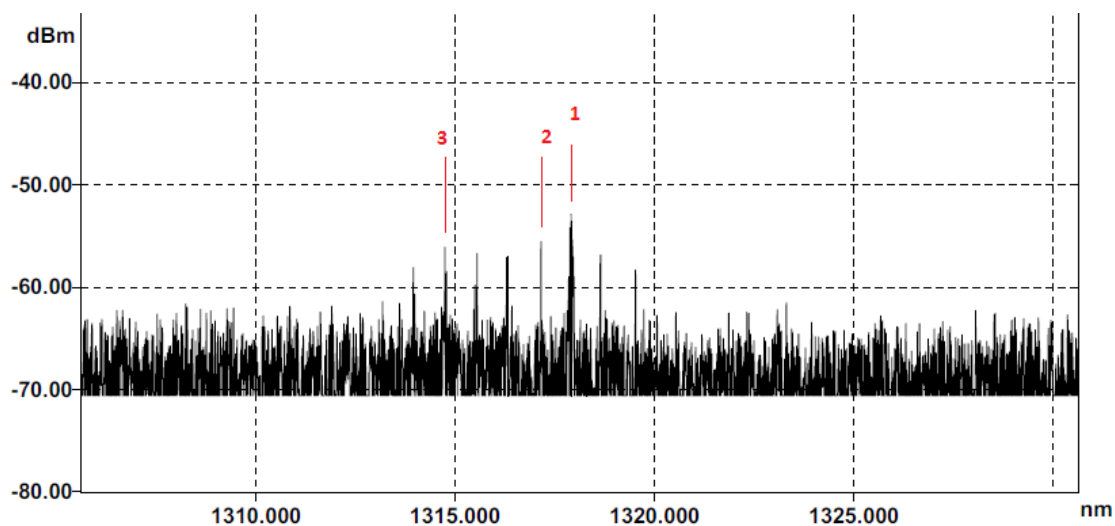


Obrázok 7.11: Spektrum signálu pri útlme 4 dB

Tab. 7.2: Hodnoty 3 špičiek s najvyššiou výkonovou úrovňou; pri útlme 4 dB

Špička	Vlnová dĺžka [nm]	Výkon auto. [dBm]	SNR priemer. [dB]	Šum priemer. [dBm]	Výkon špičky [dBm]	Výkon kanálu [dBm]
1	1317,471	-49,02	17,31	-66,29	-49,02	-66,87
2	1316,338	-49,27	17,41	-66,68	-49,27	-66,87
3	1316,872	-50,46	16,28	-67,42	-50,46	-66,87

Obr. 7.12 zobrazuje signálne spektrum pri nastavení útlmu 8 dB.



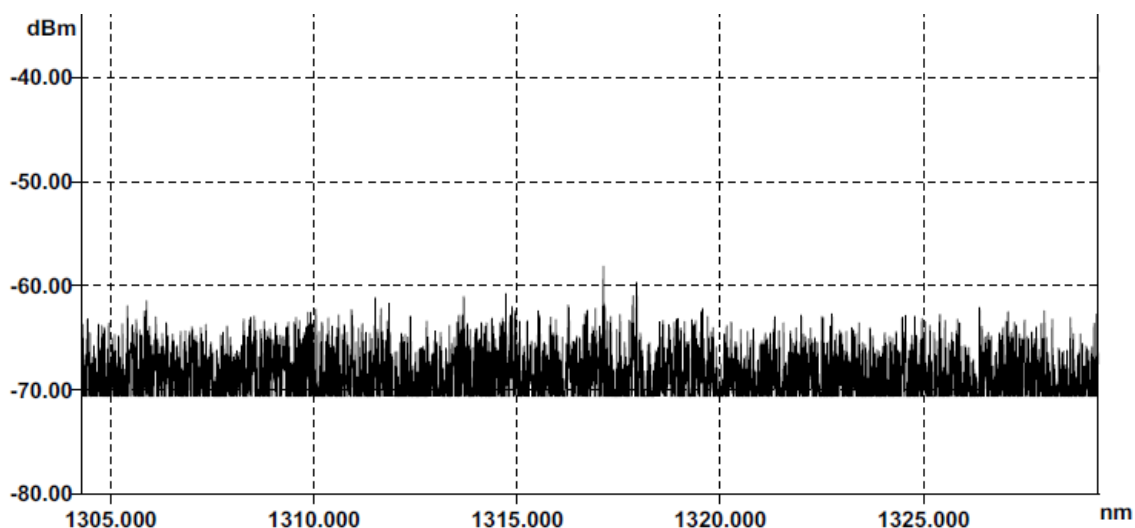
Obrázok 7.12: Spektrum signálu pri útlme 8 dB

Pri útlme 8 dB sa špičky signálu pohybovali v nízkych výkonových úrovniach. Najvyšší výkon mala špička 1 a to -53,06 dBm na vlnovej dĺžke 1317,917 nm (Tab. 7.3).

Tab. 7.3: Hodnoty 3 špičiek s najvyššiou výkonovou úrovňou; pri útlme 8 dB

Špička	Vlnová dĺžka [nm]	Výkon auto. [dBm]	SNR priemer. [dB]	Šum priemer. [dBm]	Výkon špičky [dBm]	Výkon kanálu [dBm]
1	1317,917	-53,06	13,05	-66,11	-56,41	-67,08
2	1317,162	-55,76	11,27	-67,03	-55,76	-67,08
3	1314,747	-56,41	9,10	-65,51	-53,06	-67,08

Pri útlme 12 dB už analyzátor nebol schopný rozoznať nijakú špičku, pretože výkonová úroveň optického signálu bola veľmi nízka a signál prakticky splýval so šumom. Spektrum signálu pri útlme 12 dB je na Obr. 7.13.



Obrázok 7.13: Spektrum signálu pri útlme 12 dB

Maximálny dosah siete bol testovaný zvyšovaním útlmu na útlmovom článku až pokým LED indikátory OLT a PON na ONU jednotke neprestali svietiť. Vtedy už ONU jednotka nedokázala nadviazať spojenie s OLT. Maximálny útlm nastavený na útlmovom článku, pri ktorom bola ONU jednotka schopná komunikovať s OLT bolo 24,4 dB. Pri 24,5 dB sa spojenie rozpadlo. Po pričítaní vložného útlmu útlmového článku je celkový útlm 27 dB. Pri útlme vlákna 0,25 dB/km, by mala sieť EPON schopná komunikovať až na vzdialenosť 108 km.

## 7.4 Vyhodnotenie

Simulované výsledky sa značne odlišujú od výsledkov zmeraných v laboratóriu. Dosah siete EPON v simulácii bez využitého zosilňovača bol 49 km, avšak reálna sieť EPON sa javí s omnoho lepšími vlastnosťami, pri ktorých je možné prekonať trasu o dĺžke až 108 km. Za predpokladu 2,5 násobného zvýšenia dosahu siete s využitím polovodičového zosilňovača tak ako to bolo v simulácii by sa jednalo o vzdialenosť presahujúca hranicu 250 km. Nanešťastie simulácie neodpovedajú skutočným charakteristikám, nepočítajú s okolitými faktormi, preto nesmieme túto hodnotu brať za samozrejmu. Pre presnejšiu simuláciu by boli potrebné parametre ako sú napríklad citlivosť fotodiód použitých v jednotkách OLT a ONU. Tieto parametre sú však výrobným tajomstvom výrobcu a nie sú dostupné pre verejnosť. Po získaní týchto parametrov by výsledky simulácie boli odlišné a presnejšie.



## 8 Záver

Hlavným cieľom tejto práce bolo overiť funkčnosť EPON siete s použitím SOA zosilňovača v vzostupnom smere pre vlnovú dĺžku 1310 nm a zistiť tak maximálny dosah optickej siete a poukázať tak na to či je výhodné takéto optické siete zostavovať, pričom SOA zosilňovače z ekonomického hľadiska predstavujú jednu z najlepších alternatív na zosilnenie optického signálu.

V prvej kapitole teoretickej časti som sa zaoberal využitím optických prístupových sietí, ich výhodami a základnými prvkami využitých v optických sieťach spolu s vysvetlením ich základných funkcií.

Druhá kapitola bola zameraná na rozdelenie optických prístupových sietí z hľadiska umiestnenia ich koncových bodov a použitých prvkov. Vysvetlil som ich základné princípy a parametre, a uviedol som príklady najpoužívanjších spolu s ich popisom.

Ďalšia kapitola sa zaoberala Ethernetovou pasívnou optickou sieťou a jej hlavnými parametrami. Vysvetlený bol princíp výmeny správ medzi OLT a ONU jednotkami s využitím MPCP protokolu ako aj pridelovanie časových slotov pre vysielanie jednotlivých ONU jednotiek.

Kapitola Optické zosilňovače je cieľená na vysvetlenie základných princípov funkčnosti všeobecne ako ja princíp zosilňovania dvoch z troch najčastejšie využívaných optických zosilňovačov v optických sieťach, ktorými sú vláknom dopované zosilňovače a Ramanove zosilňovače. Taktiež sa zaoberám využitím zosilňovačov v závislosti od umiestnenia na telekomunikačnej trase.

V ďalšej samostatnej kapitole sa zameriavam na polovodičové zosilňovače. Zohľadňujem faktory, ktoré sú potrebné pri zosilňovaní v polovodičovom materiáli a popisujem princíp zosilňovania spontánnou emisiou. Porovnávam tu dve základné prevedenia, ktorými sú TWA a FPA. V poslednej časti kapitoly sa venujem využitiu nelienarít SOA.

Praktická časť bakalárskej začínala s oboznámením sa so softwarovou aplikáciou Optiwave OptiSystem slúžiacou na simuláciu optickej komunikácie. V aplikácii som zhotovil návrh siete EPON, kde som musel pre jednotlivé bloky vybrať vhodné prvky a nastaviť ich parametre tak aby čo najviac odpovedali tým skutočným. Simulácie boli prevedené ako so zosilňovačom tak aj bez. Podľa výsledkov simulácie sa využitie SOA zosilňovača javí ako dobrá voľba, pretože s jeho využitím sa zvýšil dosah ONU jednotky o 155%.



Úlohou v druhej časti bolo demonštrovať skutočnosti zo simulácie aj v praxi. Keďže sa na zosilňovači našla výrobná vada, nebolo možné to overiť. Preto prebehlo len alternatívne meranie maximálneho dosahu siete bez zosilňovača, kde bolo potrebné nakonfigurovať OLT a ONU jednotky na komunikáciu v sieti EPON. Následne som s využitím spektrálneho analyzátora sledoval spektrum vlnových dĺžok v pracovnej oblasti laseru ONU jednotky. Za použitia útlmového článku, ktorý slúžil ako náhrada skutočnej optickej trasy, som zvyšoval útlm až po rozpad komunikácie medzi OLT a ONU. Ten nastal po 108 kilometroch. V prípade, že by bol zapojený zosilňovač a zvýšil by dosah o 155%, jednalo by sa o skutočne ďalekosiahlu sieť.

V prípade, že bude v budúcnosti zosilňovač k dispozícii, by som si rád preveril jeho skutočný dosah, čím by som si porovnal výsledok so simuláciou a zistil skutočnú efektivitu tohto zosilňovača. Podobne tak by bolo vhodné otestovať SOA pracujúci v pásme C na vlnovej dĺžke 1550 nm s využitím v sieti EPON a analyzovať jeho vplyv na kvalitu služby TriplePlay.

## Použitá literatura

- [1] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-optic communication systems*. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 2002. ISBN 04-712-2114-7.
- [2] BURČÍK, J. Ramanovské zesilovače pro telekomunikace. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032401>
- [3] CONNELLY, Michael J. *Semiconductor optical amplifiers*. London: Kluwer Academic, c2002, x, 169 p. ISBN 07-923-7657-9.
- [4] ČECH, Martin. *Optické zesilovače pro metropolitní a přístupové sítě*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] DIXIT, Sudhir. *IP over WDM: Building the next-generation optical Internet*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2003, xx, 557 p. ISBN 04-712-1248-2.
- [6] Fiber Amplifiers. In: [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/fiber\\_amplifiers.html](http://www.rp-photonics.com/fiber_amplifiers.html)
- [7] *Fiber optics handbook: fiber, devices, and systems for optical communications*. Editor Michael Bass, Eric W Van Stryland. New York: McGraw-Hill Professional, 2001, 1 sv. (různé stránkování). McGraw-Hill telecom engineering. ISBN 00-713-8623-8.
- [8] GUO, Qingyi. *STUDY OF PASSIVE OPTICAL NETWORK (PON): SYSTEM AND DEVICES*. Hamilton, 2013. Dostupné z: <http://digitalcommons.mcmaster.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=9722&context=opendissertations>. Dizertační práce. McMaster University.
- [9] HANULÁK, Patrik. *Analýza kvality VoIP v rámci služby TriplePlay*. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [10] HEADLEY, Clifford a G AGRAWAL. *Raman amplification in fiber optical communication systems*. Boston: Elsevier Academic Press, c2005, xiii, 374 p. ISBN 01-204-4506-9.
- [11] KARTALOPOULOS, Stamatios V. *Introduction to DWDM technology: data in a rainbow*. Bellingham, Wash.: SPIE Optical Engineering Press, c2000, xxii, 252 p. ISBN 07-803-5399-4.
- [12] KAZOVSKY, Leonid G, Ning CHENG, Wei-TAo SHAW, David GUTIERREZ a Shing-Wa WONG. *Broadband optical access networks*. Hoboken: John Wiley, c2011, xvi, 283 s. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [13] KEISER, Gerd. *Optical communications essentials*. New York: McGraw-Hill, c2003, xix, 373 p. ISBN 00-714-1204-2.
- [14] KEISER, Gerd. *Optical fiber communications*. 3rd ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 2000, xxi, 602 p. ISBN 00-723-6076-3.

- [15] KRIŠTOF, Dominik. *Skúmanie vplyvu dĺžky aktívnej oblasti polovodičového optického zosilňovača (SOA) pri optickom spracovaní signálu*. Žilina, 2006. Diplomová práca. Žilinská univerzita v Žiline.
- [16] LAFATA, P. Pasivní optické sítě WDM-PON. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-wdm-pon&cislocclanku=2009050004>
- [17] LAFATA, P. a J. VODRÁŽKA. Pasivní optická síť GPON. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050002>
- [18] LALLUKKA, Sami a RAATIKAINEN. *Passive optical networks: transport concepts*. Espoo: VTT, 2006. ISBN 95-138-6706-4.
- [19] LAM, Cedric F. *Passive optical networks: principles and practice*. Boston: Elsevier/Academic Press, c2007, xlv, 324 p. ISBN 01-237-3853-9.
- [20] LUCKI, Michal. Optické zesilovače. In: [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: [http://data.cedupoint.cz/oppa\\_e-learning/2\\_KME/162.pdf](http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/162.pdf)
- [21] OMELKA, Peter. *Polovodičové zosilňovače optického signálu pre plne transparentné optické siete*. Žilina, 2008. Bakalárska práca. Žilinská univerzita v Žiline.
- [22] Optické vlákno a kably. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: [http://students.math.slu.cz/jakubchovanec/skola/PCsit/Ukoly/Opticke%20vlakno/view\\_php.htm](http://students.math.slu.cz/jakubchovanec/skola/PCsit/Ukoly/Opticke%20vlakno/view_php.htm)
- [23] PRIBIŠAN, Dušan. Základy vláknovej optiky: Optické technológie. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: [http://dusan.robobalasko.net/wp-content/uploads/opticke\\_technologie.pdf](http://dusan.robobalasko.net/wp-content/uploads/opticke_technologie.pdf)
- [24] ŠIFTA, Radim, MÜNSTER a Martin ŤUPA. Měření parametrů QoS v pasivní optické síti EPON. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/mereni-parametru-qos-v-pasivni-opticke-siti-epon/>
- [25] ŠUSTR, Pavel. *Optický zesilovač v laboratorní výuce*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [26] The difference between a PC, SPC, UPC and APC finish on a fiber optic connector and which one you should choose. [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: [http://wiki.nesevo.com/index.php/The\\_difference\\_between\\_a\\_PC,\\_SPC,\\_UPC\\_and\\_A\\_PC\\_finish\\_on\\_a\\_fiber\\_optic\\_connector\\_and\\_which\\_one\\_you\\_should\\_choose](http://wiki.nesevo.com/index.php/The_difference_between_a_PC,_SPC,_UPC_and_A_PC_finish_on_a_fiber_optic_connector_and_which_one_you_should_choose)
- [27] VENKATARAMANAN, Venkat. *Optical Amplifiers*. Presentation. University of Toronto.
- [28] VODRÁŽKA, J. Optické přístupové sítě EPON a CWDM. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2005070401>

- [29] VYSTAVĚL, Tomáš. *Měření zesílení vláknově optického zesilovače*. Ostrava, 2009. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická Univerzita Ostrava.

## **Prílohy**

## Zoznam príloh

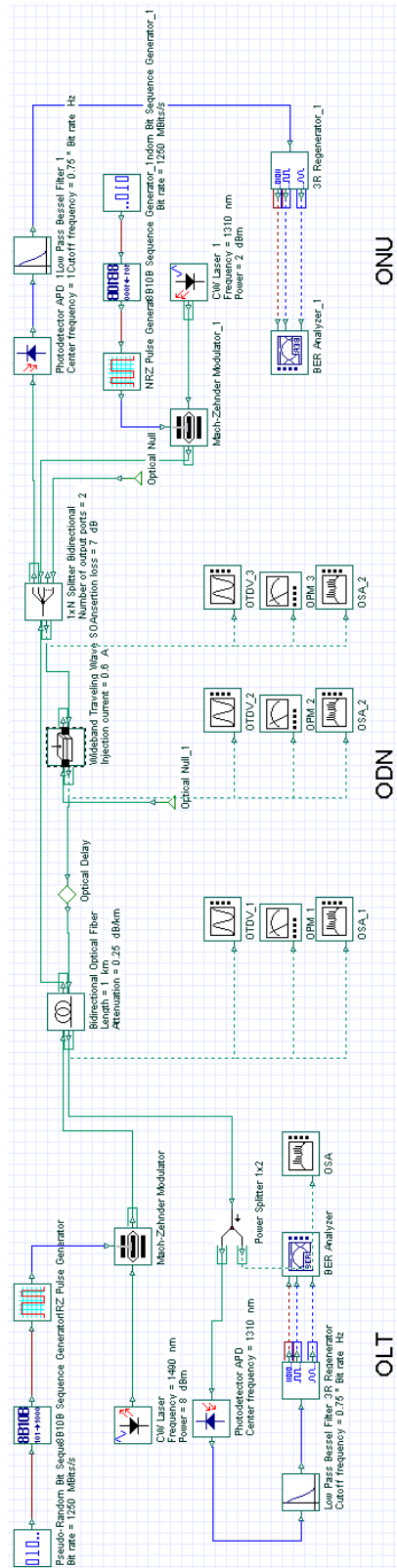
Príloha A:	Zapojenie EPON v programe OptiSystem .....	VII
Príloha B:	Spektrum zesilneného signálu a celkový výkon .....	VIII
Príloha C:	Zobrazenie impulzov po prechode trasou (L – dĺžka trasy) .....	IX
Príloha D:	Optický výkon .....	X

Součástíou Bakalárskej práce je DVD.

Adresárová štruktúra DVD:

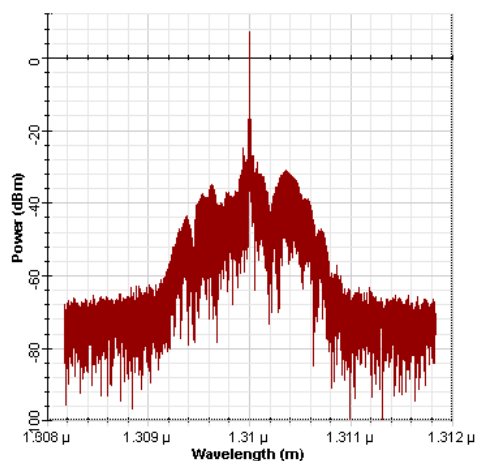
- Simulácie Optisystem
  - o EPON\_with\_SOA.osd
  - o EPON\_without\_SOA.osd
- Bakalárska práca
  - o Bakalárska práca.pdf

Príloha A: Zapojenie EPON v programe OptiSystem

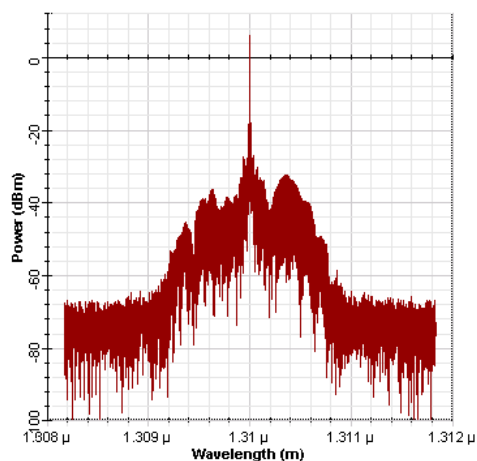


---

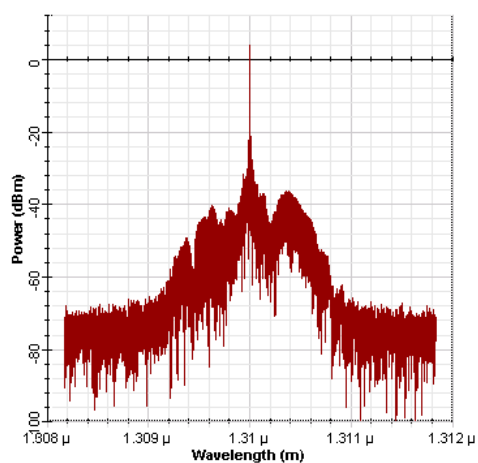
Príloha B: *Spektrum zosilneného signálu a celkový výkon*



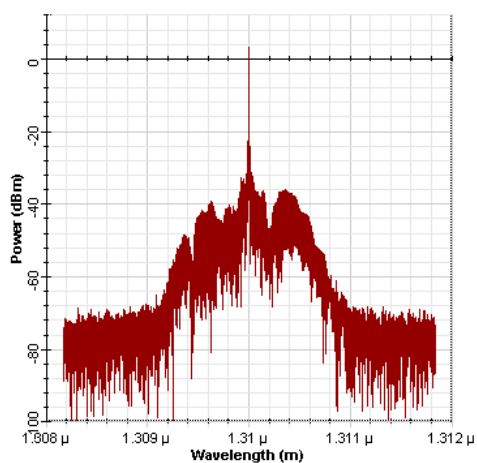
L = 5 km; P = 9,919 dBm



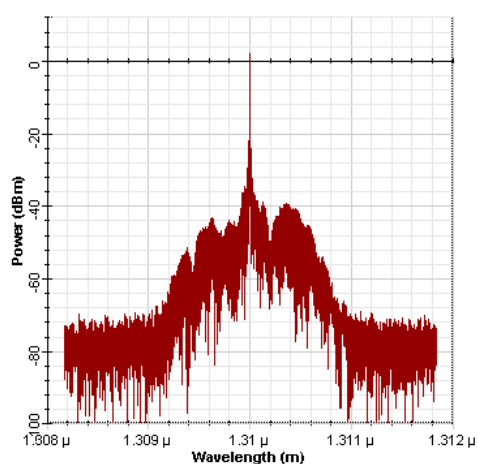
L = 10 km; P = 7,977 dBm



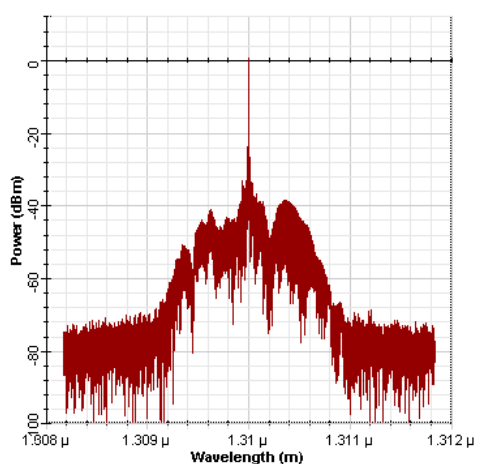
L = 15 km; P = 6,727 dBm



L = 20 km; P = 5,477 dBm



L = 25 km; P = 4,227 dBm

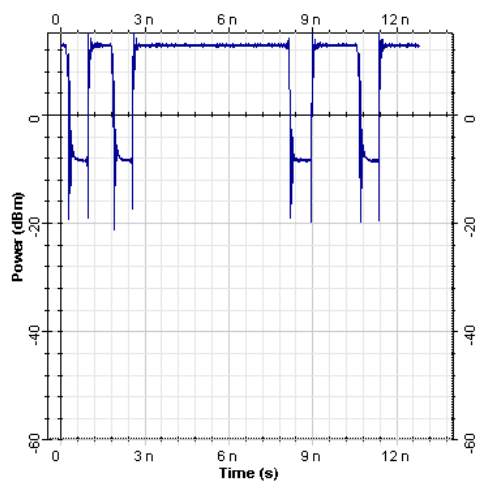


L = 30 km; P = 2,969 dBm

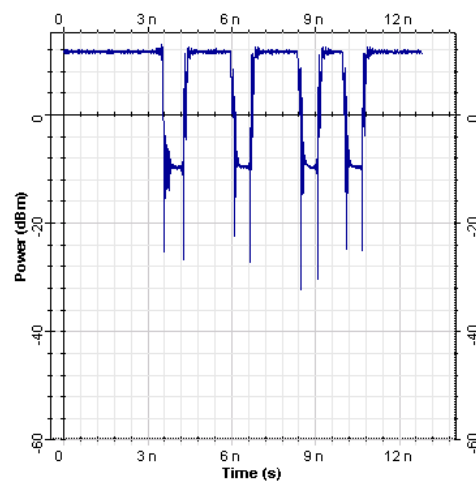


---

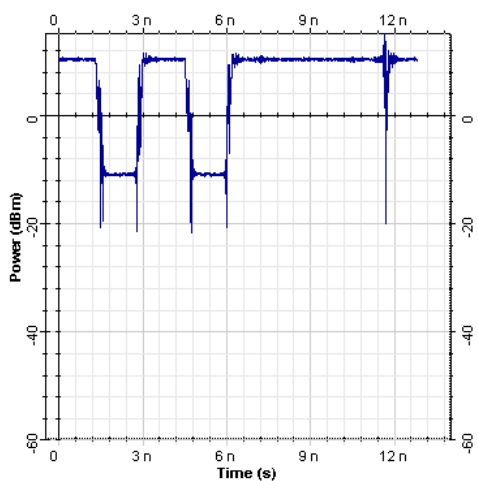
Príloha C: Zobrazenie impulzov po prechode trasou ( $L$  – dĺžka trasy)



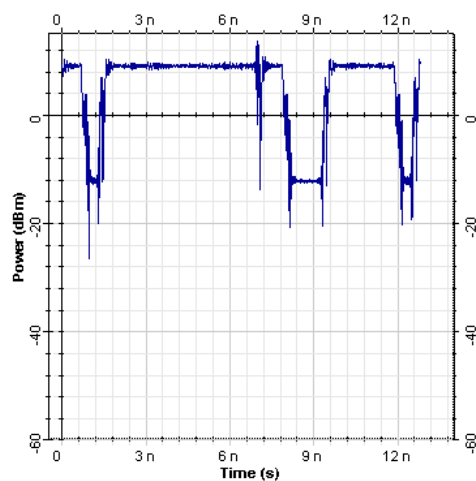
$L = 5$  km



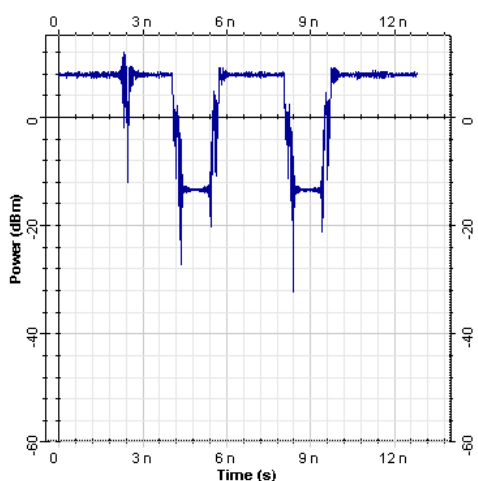
$L = 10$  km



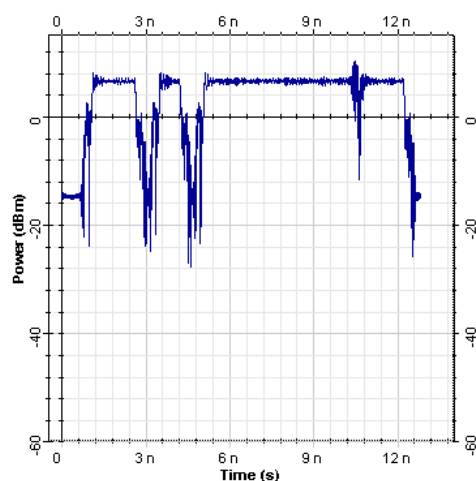
$L = 15$  km



$L = 20$  km



$L = 25$  km



$L = 30$  km

---

Príloha D: *Optický výkon*

Tabuľka úrovne zosilneného optického výkonu po prekonaní optickej trasy v programe OptiSystem

Dĺžka trasy [km]	Optický výkon [dBm]	Dĺžka trasy [km]	Optický výkon [dBm]
5	9,219	65	-5,773
10	7,977	70	-7,023
15	6,727	75	-8,281
20	5,477	80	-9,530
25	4,227	85	-10,773
30	2,969	90	-12,023
35	1,727	95	-13,279
40	0,468	100	-14,529
45	-0,773	105	-15,773
50	-2,023	110	-17,023
55	3,280	115	-18,281
60	-4,531	120	-19,531